



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

TECHNOLOGICKÉ POSTUPY PÁJENÍ POUZDER QFN

QFN PACKAGES SOLDERING AND TECHNOLOGY PROCEDURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

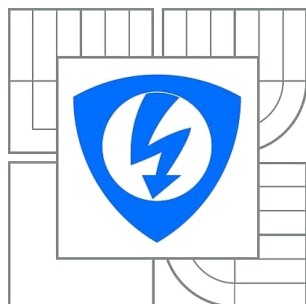
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV JAKUB

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ STARÝ, Ph.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Miroslav Jakub
Ročník: 2

ID: 125231
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Technologické postupy pájení pouzder QFN

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte odbornou literaturu z oblasti pájení přetavením. Podrobněji se zaměřte na pájení pouzder QFN.

Navrhněte metodu měření teploty.

Proměřte a optimalizujte teplotní profily u vybraných QFN pouzder. Vyhodnoťte vzhled spoje, mikrovýbrus spoje (opticky a pomocí SEM), určete tloušťku IMC vrstvy.

Zpracujte v programu Solid Works 3D model přestupu tepla QFN pouzdem během pájení přetavením. Navrhněte technologický postup pájení QFN pouzder na produkční DPS.

Diskutujte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 10.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT:

Diplomová práce se zabývá technologickými postupy pájení pouzder QFN. Cílem teoretické části je popis QFN pouzder, jejich montáže a pájení přetavením na desky plošných spojů ve výrobě firmy Honeywell.

Cílem praktické části je navrhnout metodu měření teploty a optimalizovat teplotní profily na vybraných DPS s QFN pouzdry na konvekční (HONEYWELL) a IR (VUT) peci. Porovnat a vyhodnotit teplotní profily 3 produkčních DPS s QFN pouzdry za použití pájecí pasty AIM NC257-2. Hlavní částí diplomové práce jsou vyhodnocení vzhledu spoje, příprava mikrovýbrusu a měření tloušťky intermetalické vrstvy pomocí optického a elektronového mikroskopu, analyzovat a studovat vzniklé defekty na QFN pouzdru během procesu pájení. Tyto testy byly provedeny s 2 produkčními DPS. Optimalizace SPI a technologického postupu pájení, kde byly analyzovány QFN pouzdra, byly provedeny na jednom typu DPS. Zajímavou částí této diplomové práce je vytvoření 3D modelu přestupu tepla QFN pouzrem během pájení přetavením v programu SolidWorks.

KLÍČOVÁ SLOVA:

QFN, pouzdro, pájení, přetavení, termočlánek, termovizní kamera, teplotní profil, AIM NC257-2, SlimKic2000, SolidWorks, šablonový tisk.

ABSTRACT:

This master's thesis deals with QFN packages soldering and technology procedures optimization. The aim of theoretical part is description of QFN packages, their assembly and reflow soldering on PCB in HONEYWELL.

The aim of the practical part is to propose a method of measuring temperature and optimizing the thermal profiles of selected PCB with QFN packages by using convection (HONEYWELL) and infrared (BUT) reflow ovens. Comparison and evaluation of thermal profiles for 3 production PCBs with QFN packages using solder paste AIM NC257-2 were realised. The main part of master's thesis are appearance evaluation of solder joints, preparing microsection and measuring intermetallic layers thickness by using the optical and the scanning electron microscopes, analysis and study of QFN defects created during soldering process. These tests were performed with 2 production PCBs. Optimization of SPI and soldering technology procedures where were analyzed QFN packages were processed on one type of PCB. Interesting part of this diploma thesis is creating of the 3D heat transfer model of QFN package during the reflow soldering in SolidWorks.

KEYWORDS:

QFN, package, solder, reflow, thermocouple, thermal camera, thermal profile, AIM NC257-2, SlimKic2000, SolidWorks, stencil printing.

JAKUB, M. *Technologické postupy pájení pouzder QFN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 102 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Technologické postupy pájení pouzder QFN jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 28. května. 2015

.....
(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Také děkuji pracovníkům firmy Honeywell - Ing. Janu Pastorkovi, Ing. Zdeňku Jurčíkovi za poskytnutí informací, přístupu do výroby a výpomoc při realizaci praktické části projektu. Dále děkuji panu Ing. Petru Vyroubalovi, panu Ing. Pavlu Čudkovi za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování mé práce.

V Brně dne 28. května 2015

.....
(podpis autora)

OBSAH

ÚVOD	14
1 POUZDRA QFN	15
1.1 Druhy kontaktů QFN pouzder	15
1.2 Návrh pájecích ploch na DPS	16
2 PÁJENÍ PŘETAVENÍM A PÁJENÝ SPOJ	18
2.1 Druhy přenosu tepla	18
2.2 Přehled metod pájení přetavením	20
2.3 Teplotní profil při montáži QFN	23
3 PRINCIPY MĚŘENÍ TEPLoty	26
3.1 Termočlánky	26
3.2 Termografie	28
4 METODIKA MĚŘENÍ A SIMULACE	29
4.1 Měření teplotních profilů a snímání termovizní kamerou	29
4.2 Pozorování a vyhodnocení pájeného spoje	30
4.3 Modelování v Solidworks	33
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
5.1 Metoda měření teploty	34
5.1.1 Umístění a připevnění termočlánků	34
5.1.2 Pozorování produkční DPS č. SM10019 termovizní kamerou	35
5.1.3 Porovnání teplot naměřených termočlánkem a termovizní kamerou	36
5.2 Optimalizování teplotních profilů QFN pouzder na produkčních DPS.	38
5.2.1 Teplotní profily produkčních DPS – horkovzdušná pec HELLER	41
5.2.2 Teplotní profily produkčních DPS – IR pec DIMA SMRO-0180	47
5.2.3 Porovnání s parametry uvedenými výrobcem pájecí pasty a IPC7093	48
5.3 Tloušťka intermetalické sloučeniny a analýza defektů	49
5.3.1 Vyhodnocení pomocí optického a elektronového mikroskopu	49
5.3.2 Rentgenová kontrola	57
5.4 Simulace přestupu tepla QFN pouzdrem	59
5.5 Technologický postup pájení QFN pouzder na produkčních DPS	65
5.5.1 Technologický tok	65
5.5.2 Statistické vyhodnocení defektů na produkčních DPS	70
5.5.3 Změna parametrů šablonového tisku	74
5.6 Diskuze	80
6 ZÁVĚR	83
7 SEZNAM LITERATURY	84
8 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	87
9 PŘÍLOHY A VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE	88

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: QFN pouzdro: a) Řez části pouzdra QFN; b) Náhled 3D modelu QFN 28 [25]..	15
Obrázek 2: QFN pouzdro s „E“ typem vývodů [25]	15
Obrázek 3: QFN pouzdro s „S“ typem vývodů [25]	15
Obrázek 4: QFN pouzdro s „Punch“ typem vývodů [25].....	16
Obrázek 5: Řez pouzdrem „Punch“ [25].....	16
Obrázek 6: Ukázka různých typů QFN s různými řady vývodů [8]	16
Obrázek 7: Tvary pájecích plošek na DPS: a) obdélníkový; b) s kulatým zakončením [12]...	17
Obrázek 8: Podélný teplotní profil typu RTS [14]	24
Obrázek 9: Podélný teplotní profil typu RSS [14]	24
Obrázek 10: Teplotní profil pájecí pasty SAC podle IPC7093[8]	25
Obrázek 11: Přehled způsobů fixace termočlánku [3]	27
Obrázek 12: Termovizní kamera Guide EasIR - 9	28
Obrázek 13: Optický mikroskop Olympus SZ61	31
Obrázek 14: Elektronový mikroskop VEGA3 XMU [26]	31
Obrázek 15: Ukázka rentgenové kontroly [6]	32
Obrázek 16: Rozložení a fixace termočlánků na DPS č. SM10019	34
Obrázek 17: Teplotní profil DPS SM10019 (DIMA)	35
Obrázek 18: Rozložení teplot v čase 103 s. $T=155,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zóna předehřevu).....	35
Obrázek 19: Rozložení teplot v čase 156 s. $T=200,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zóna vyrovnání)	35
Obrázek 20: Rozložení teplot v čase 191 s. $T=227,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zóna přetavení).....	35
Obrázek 21: Rozložení teplot v čase 251 s. $T=145,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zóna chlazení)	35
Obrázek 22: Teploty měřené na termovizní kameře a termočlánku pro určené časy	36
Obrázek 23: Produkční DPS č. IO37102	38
Obrázek 24: Produkční DPS č. SM10019	38
Obrázek 25: Produkční DPS č. SD4962DM3037	38
Obrázek 26: DIMA SMRO-0180.....	39
Obrázek 27: HELLER 1812EXL	39
Obrázek 28: Rozmístění termočlánku na DPS č. SM10019	39
Obrázek 29: Ukázka umístění DPS a dataloggeru před projetí pecí	40
Obrázek 30: Teplotní profil DPS č. SM10019, HELLER 182 EXL.....	41
Obrázek 31: Teplotní profil DPS č.IO37102, HELLER 182 EXL	44
Obrázek 32: Rozdíl teplot v zóně chlazení, IO37102	44
Obrázek 33: Teplotní profil DPS č.SD4962DM3037, HELLER 182 EXL	45
Obrázek 34: Teplotní profil DPS č. SM10019 DIMA SMRO-0180.....	47
Obrázek 35: Porovnání simulovaných a naměřených hodnot teplotního profilu.....	48
Obrázek 36: Mikrovýbrus DPS č. SM10019, celkový pohled	49
Obrázek 37: Mikrovýbrus DPS č.SM10019, boční vývod.....	49

Obrázek 38: Mikrovýbrus SM10019, měření QFN pouzdra.....	49
Obrázek 39: Mikrovýbrus,detail pod boční vývod, zvětšení 500X.....	49
Obrázek 40: Mikrovýbrus,detail pod BTC, zvětšení 500X.....	49
Obrázek 41: Mikrovýbrus DPS č.IO37102, celkový pohled	50
Obrázek 42: Mikrovýbrus DPS č.IO37102, boční vývod	51
Obrázek 43: Mikrovýbrus IO3710, měření QFN pouzdra	51
Obrázek 44: Mikrovýbrus,detail pod boční vývod, zvětšení 500X.....	51
Obrázek 45: Mikrovýbrus,detail pod BTC, zvětšení 500X.....	51
Obrázek 46: Detail na void , DPS č. IO37102	51
Obrázek 47: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní měď-pájka, pod BTC ploškou.....	52
Obrázek 48: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní měď-pájka, pod BTC ploškou.....	52
Obrázek 49: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní měď-pájka, boční vývod	52
Obrázek 50: Chemické rozložení prvků ve vybrané oblasti (mapování)	52
Obrázek 51: Spektrum rentgenového záření na rozhraní měď.....	53
Obrázek 52: Spektrum rentgenového záření na rozhraní pájka SAC305.....	53
Obrázek 53: Spektrum rentgenového záření na rozhraní IMC.....	53
Obrázek 54: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní nikl-pájka, pod BTC ploškou, několikanásobné přetavení	54
Obrázek 55: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní nikl-pájka, boční vývod, několikanásobné přetavení	54
Obrázek 56: Chemické rozložení prvků ve vybrané oblasti (mapování)	54
Obrázek 57: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní nikl-pájka, pod BTC ploškou, 1x přetavení	54
Obrázek 58: Spektrum rentgenového záření na rozhraní měď.....	55
Obrázek 59: Spektrum rentgenového záření na rozhraní měď- nikl	55
Obrázek 60: Spektrum rentgenového záření na rozhraní IMC.....	55
Obrázek 61: Spektrum rentgenového záření na rozhraní pájka SAC305.....	55
Obrázek 63: Pohled na QFN pouzdro a plošku (DPS dolní) DPS č. IO37102	57
Obrázek 64: Pohled na QFN pouzdro a plošku (DPS střední) DPS č. IO37102.....	57
Obrázek 65: Pohled na QFN pouzdro DPS č. SM10019	58
Obrázek 66: Pohled na plošku QFN pouzdra DPS č. SM10019	58
Obrázek 67: Efekt teplotního profilu na BTC voiding [17]	58
Obrázek 68: 3D model QFN pouzdra	59
Obrázek 69: Řez 3D modelu QFN pouzdra	59
Obrázek 70: Rozložení teplot v QFN pouzdra, čas: 249 s	61
Obrázek 71: Detail přestupu tepla mezi chipem, BTC, otvory (jiné rozpětí teplot)	61
Obrázek 72: Rozložení teplot na BTC, otvorech a bočních padech, čas: 249 s.....	62
Obrázek 73: Rozložení teplot uvnitř pouzdra a otvorech, čas: 249 s.....	62
Obrázek 74: Rozložení teplot celého modelu, čas: 249 s.....	62

Obrázek 75: Rozložení teplot, pohled horní rovina, vzdálenost 0,45 mm od středu, čas: 249 s	63
Obrázek 76: Porovnání měřeného a simulovaného teplotního profil DPS č. SM10019	63
Obrázek 77: Porovnání měřeného a simulovaného teplotního profil DPS č. SM10019 pro BTC	64
Obrázek 78: Srovnání výsledku měření a simulace pro teploty na povrchu pouzdra	64
Obrázek 79: Montáž QFN pouzdra	65
Obrázek 80: Zařízení pro šablonový tisk Accuflex	66
Obrázek 81: Zařízení SPI pro kontrolu nanesení pájecí pasty po šablonovém tisku	67
Obrázek 82: Zařízení pro osazení DPS součástkami	67
Obrázek 83: Konvekční pec HELLER 1812EXL	68
Obrázek 84: Zařízení pro automatickou optickou inspekci	69
Obrázek 85: Zařízení pro vnitroobvodové testování	69
Obrázek 86: Graf zobrazení chyb na DPS č. SM11472 pomocí ZX18XX	70
Obrázek 87: Graf zobrazení chyb na DPS č. SM10022S pomocí ZX18XX	71
Obrázek 88: Graf zobrazení chyb na DPS č. SM10022 pomocí SPI	72
Obrázek 89: Graf zobrazení chyb na DPS č. SD4962DM3037 pomocí SPI	72
Obrázek 90: Graf zobrazení chyb na DPS č. SM11472 pomocí SPI	73
Obrázek 91: Testovací DPS č. S4962V3158B	74
Obrázek 92: Testovací šablona a její uchycení pro DPS č. S4962V3158B	74
Obrázek 93: Uchycení šablony pro tisk pájecí pasty	74
Obrázek 94: Výsledky pro testování a optimalizaci parametrů šablonového tisku	77
Obrázek 95: Množství pájecí pasty na QFN pouzdru	78
Obrázek 96: Výška pájecí pasty na QFN pouzdru	78
Obrázek 97: Plocha pokrytá pájecí pasty na QFN pouzdru	78
Obrázek 98: Teplotní profil DPS IO37102 (DIMA)	88
Obrázek 99: Rozložení teplot v čase 102 s. $T=141,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zóna předehřevu)	88
Obrázek 100: Rozložení teplot v čase 153 s. $T=192,4\text{ }^{\circ}\text{C}$	88
Obrázek 101: Rozložení teplot v čase 230 s. $T=211,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zóna přetavení)	88
Obrázek 102: Rozložení teplot v čase 280s. $T=114,5^{\circ}\text{C}$ (Zónachlazení)	88
Obrázek 103: Teplotní profil DPS SD4962DM3037 (DIMA)	89
Obrázek 104: Rozložení teplot v čase 105 s. $T=147^{\circ}\text{C}$ (Zóna předehřevu)	89
Obrázek 105: Rozložení teplot v čase 153 s. $T=189,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	89
Obrázek 106: Rozložení teplot v čase 184 s. $T=229,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zóna přetavení)	89
Obrázek 107: Rozložení teplot v čase 256 s. $T=152,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zónachlazení)	89
Obrázek 108: Teplotní profil DPS č. SM10019, HELLER 182 EXL, 1. projetí	90
Obrázek 109: Teplotní profil DPS č. SM10019, HELLER 182 EXL, 2. projetí	90
Obrázek 110: Teplotní profil DPS č. SM10019, HELLER 182 EXL, 3. projetí	90
Obrázek 111: Teplotní profil DPS č. SD4962DM3037, HELLER 182 EXL, 1. projetí	92

Obrázek 112: Teplotní profil DPS č.SD4962DM3037, HELLER 182 EXL, 2. projetí.....	92
Obrázek 113: Teplotní profil DPS č.SD4962DM3037, HELLER 182 EXL, 3. projetí.....	92
Obrázek 114: Rozložení teplot v řezu pouzdra	97
Obrázek 115: Rozložení teplot v řezu pouzdra (tepelný tok).....	97
Obrázek 116: Rozložení teplot na otvorech a povrchu pouzdra	97
Obrázek 117: Rozložení teplot na otvorech a BTC.....	97
Obrázek 118: Rozložení teplot po povrchu QFN pouzdra a FR4	97
Obrázek 119: Rozložení teplot uvnitř pouzdra a otvorech.....	98
Obrázek 120: Rozložení teplot v otvorech	98
Obrázek 121: Rozložení teplot v řezu pouzdra (tepelný tok).....	99
Obrázek 122: Rozložení teplot na otvorech	99
Obrázek 123: Rozložení teplot v řezu pouzdra	100
Obrázek 124: Rozložení teplot v řezu pouzdra (tepelný tok).....	100
Obrázek 125: Rozložení teplot na povrchu pouzdra a otvorech	100
Obrázek 126: Rozložení teplot na BTC a otvorech.....	100
Obrázek 127: Rozložení teplot po povrchu pouzdra QFN a FR4	100
Obrázek 128: Rozložení teplot uvnitř pouzdra a otvorech.....	101
Obrázek 129: Rozložení teplot na otvorech a BTC.....	101
Obrázek 130: Zobrazení četnosti objemu pájecí pasty.....	102
Obrázek 131: Zobrazení četnosti výšky pájecí pasty	102
Obrázek 132: Zobrazení četnosti pokrytí padu pájecí pastou	102

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Termočlánky a jejich vlastnosti [2] [7] [14]	27
Tabulka 2: Hodnoty PWI pro DPS č. SM10019	35
Tabulka 3: Nastavené teploty v zónách HELLER 1812 EXL pro DPS SM10019	40
Tabulka 4: Nastavené teploty v zónách HELLER 1812 EXL pro DPS IO37102.....	40
Tabulka 5: Nastavené teploty v zónách HELLER 1812 EXL pro DPS SD4962DM3037	40
Tabulka 6: Typické hodnoty profilu pro SAC305 nebo SAC 405 IPC7093 [8]	41
Tabulka 7: Typické hodnoty profilu pro pájecí pastu AIM NC257-2 [8]	41
Tabulka 8: Naměřené hodnoty DPS č. SM10019 pomocí MOLLE.....	42
Tabulka 9: Průměr všech změřených profilů DPS č. SM10019 pomocí a MOLLE	42
Tabulka 10: Naměřené hodnoty DPS č. IO37102 pomocí a MOLLE	45
Tabulka 11: Naměřené hodnoty DPS č. SD4962DM3037 pomocí a MOLLE	46
Tabulka 12: Průměr všech změřených profilů DPS č. SD4962DM3037 pomocí a MOLLE ..	46
Tabulka 13: Naměřené hodnoty DPS č. SM10019 pomocí SLIMKIC 2000	47
Tabulka 14: Jednotlivá měření tloušťky IMC vrstvy, průměrná hodnota	53
Tabulka 15: Výsledky EDS analýzy zkoumaných oblastí, SM10019	53
Tabulka 16: Měření tloušťky IMC vrstvy, průměrná hodnota, DPS 1x přetavena	55
Tabulka 17: Měření tloušťky IMC vrstvy, průměrná hodnota, DPS několikanásobně přetavena	55
Tabulka 18: Výsledky EDS analýzy zkoumaných oblastí, IO37102	56
Tabulka 19: Pravděpodobnost výskytu dutin na BTC za použití různých šablon [8].....	58
Tabulka 20: Nastavení průvodce simulací	59
Tabulka 21: Materiály použité v simulaci	60
Tabulka 22: Přehled cílů výpočtu.....	60
Tabulka 23: Výsledky simulace, čas 249 s.....	61
Tabulka 24: Celkový přehled testovaných DPS na zařízení ICT	70
Tabulka 25: Výsledky pro 1. měření parametrů šablonového tisku.....	76
Tabulka 26: Výsledky pro 2. měření parametrů šablonového tisku_rychlost tisku 30 mm/s ..	76
Tabulka 27: Výsledky pro 3. měření parametrů šablonového tisku_tlak těrky 3,5 kg.....	76
Tabulka 28: Výsledky pro 4. měření parametrů šablonového tisku_rychlost odtrhu 1 mm/s..	76
Tabulka 29: Maximální a minimální změřené výsledky jednotlivých měření	79
Tabulka 30: Hodnoty PWI pro DPS č. IO37102.....	88
Tabulka 31: Hodnoty PWI pro DPS č. SD4962DM3037	89
Tabulka 32: Naměřené hodnoty DPS č. SM10019 pomocí a MOLLE, 1. projetí	91
Tabulka 33: Naměřené hodnoty DPS č. SM10019 pomocí a MOLLE, 3. projetí	91
Tabulka 34: Naměřené hodnoty DPS č. SD4962DM3037 pomocí a MOLLE, 2. projetí	93
Tabulka 35: Naměřené hodnoty DPS č. SD4962DM3037 pomocí a MOLLE, 3. projetí	93

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 Porovnání metod měření teploty	88
Příloha č. 2 Profily DPS naměřené na HELLER 1812EXL.....	90
Příloha č. 3 Vlastnosti pájecí pasty AIM NC257-2.....	94
Příloha č. 4 Výsledky ze simulace přestupu tepla QFN pouzdra v SolidWorks	97
Příloha č. 5 Výsledky SPI pro testování šablonového tisku.....	102

ÚVOD

Tato práce se zabývá technologickými postupy pájení pouzder QFN. Vlivem rychlého vývoje elektrotechniky se součástky neustále zmenšují a modernizují. Se zvyšující se hustotou prvků na čipu a počtu součástek na DPS vznikla i nová pouzdra a způsoby pouzdření čipů. Tato pouzdra splňují požadavky na lepší elektrické vlastnosti, rostoucí počet vývodů, nutnost minimálně zabírat plochu na DPS a dobrého odvodu tepla do ovzduší či desky. Díky propojování a modernímu pouzdření je proces montáže ekonomicky výhodnější. Ideální volba splňující tyto vlastnosti je pouzdro QFN. QFN se stávají stále oblíbenějšími díky jejich malým rozměrům, lepšímu zemnění, tvaru a odvodu tepla.

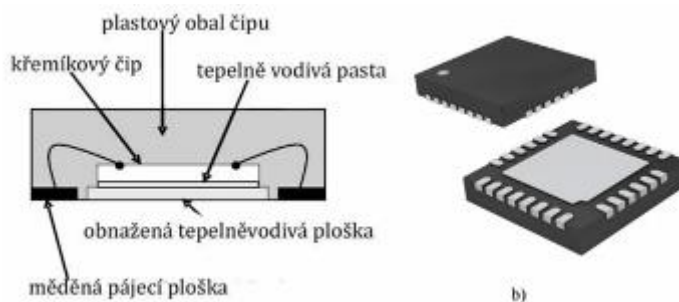
Po teoretickém prostudování informací o pájení přetavením byla v této práci věnována pozornost návržení metody měření teploty, která je účinná, přesná a zároveň jednoduchá. Porovnává metody měření teploty termočlánky typu K a termovizní kamerou. Jsou zde uvedeny kroky, které je třeba udělat pro dosažení přesných i reprodukovatelných výsledků. Z tohoto důvodu snižujících rozměrů součástek a potřeby znát působení tepla, je další část práce zaměřená na proměření a optimalizaci teplotních profilů u QFN pouzder. Analyzuje vnitřní strukturu pouzdra a vzhled spoje, který vznikne po procesu pájení přetavením. Používá optické mikroskopy a pro určení tloušťky intermetalické vrstvy využívá elektronového mikroskopu typu VEGA 3XMU. Jsou zde uvedeny i kontroly pro zjištění příčin chyb. Např. statistické vyhodnocení z kontrolního zařízení SPI a ICT. Pro účely vizualizace a simulace přestupu tepla QFN pouzdrem, při pájení přetavením, byl v programu SolidWorks navržen 3D model QFN pouzdra s DPS typu FR4. Pro okrajové podmínky se využily hodnoty z naměřených teplotních profilů firmy Honeywell. V poslední části je popsán technologický postup pájení QFN pouzder na produkčních DPS. Jsou zde popsány požadavky návrhu, montáže, pájení pouzder QFN a potenciální problémy, zvláště u procesu nanesení pájecí pasty šablonovým tiskem.

Tato diplomová práce byla realizována ve spolupráci s firmou Honeywell, která v průběhu realizace poskytla data, informace, materiál a prostor pro řešení dané problematiky.

1 POUZDRA QFN

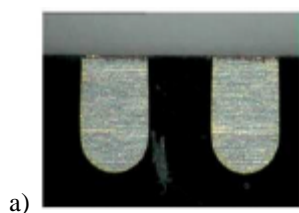
1.1 Druhy kontaktů QFN pouzder

QFN neboli „Quad Flatpack No-lead“ je pouzdro bez klasických drátových vývodů. Pro připojení do obvodu slouží ploché kontakty na okrajích spodních stran desky kolem celého obvodu. Pouzdro má malé rozměry obvodu a nezaberou místo na DPS. Pouzdro je navrženo na odvádění tepla z křemíkového čipu na větší zemní plošku připájenou na DPS s co nejmenším teplotním odporem. Montáž se provádí technologií pájení přetavením. Podle provedení a tvaru kontaktů rozeznáváme pouzdra QFN typu „E“, „S“, „D“, „Punch“. [12] [25]

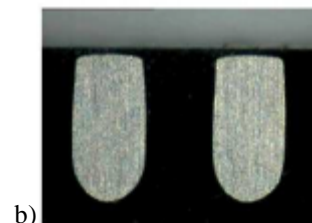


Obrázek 1: QFN pouzdro: a) Řez části pouzdra QFN; b) Náhled 3D modelu QFN 28 [25]

Typ „E“ má pájecí plošky vyvedeny po stranách pouzdra až k okraji. Při pájení přetavením očekáváme pájku na DPS a na hraně z vnější strany na pouzdře obvodu. Očekávaný výsledek není zaručen, záleží na návrhu desky plošných spojů, pájecí pastě, její viskozitě a podmínkách pro montáž a osazení pouzdra. Při pájení přetavením je potřeba dodržet podmínky doporučené výrobcem, aby se získaly požadované výsledky.



Obrázek 2: QFN pouzdro s „E“ typem vývodů [25]



Obrázek 3: QFN pouzdro s „S“ typem vývodů [25]

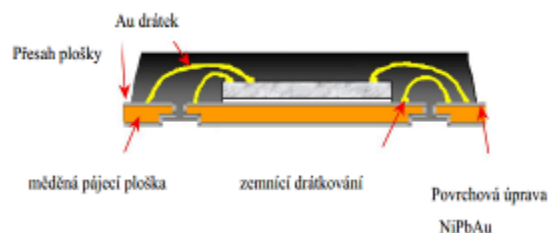
Typ „S“ má plošku pouze na spodní straně. Vyrábí se vystřížením součástky z pásky s několika QFN pouzdry. V pouzdře jsou konce mírně zapuštěny. Obvody typu „S“ jsou ve výrobě stále podporovány, ale dnes jsou více používány pouzdra typu „E“.

Typ „D“ je pouzdro s kontakty upravené tak, že je v nich mechanicky vytvořen prostor „dolíčky“ pro vyplnění pájkou. Slouží především k optimalizaci pájecího procesu. Na výběr pájecí pasty, šablony tisku a pájecího profilu přetavení mají velký vliv rozměrové vlastnosti (velikost a tvar) pájecí plošky. [12] [25]

Typ „Punch“ má kontakty vyvedeny ve spodní části i po stranách (přesahující plošky, viditelné i z vrchu). Vytváří se vystřížením zapouzdržené součástky z vyrobené série pouzder.



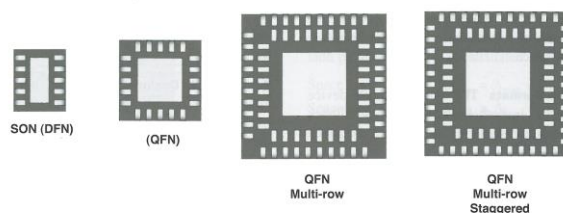
Obrázek 4: QFN pouzdro s „Punch“ typem vývodů [25]



Obrázek 5: Řez pouzdrém „Punch“ [25]

1.2 Návrh pájecích ploch na DPS

Pouzdra QFN se vyrábějí v provedení s jednou, dvěma nebo více řadami vývodů. Hlavní výhoda je možnost použití více složitějších, náročnějších a menších obvodů uvnitř pouzdra. Nejmenší vzdálenost vývodů je 0,5 mm. Výška se pohybuje v rozmezí 0,4 - 1,4 mm. Má lepší vlastnosti díky konstrukci např. menší parazitní kapacitu a indukčnost. Dnes nejvíce používaný typ je s jednou řadou vývodů (cesty vedeny po vrchní straně desky). K chlazení čipu slouží pájecí ploška uprostřed pouzdra.



Obrázek 6: Ukázka různých typů QFN s různými řady vývodů [8]

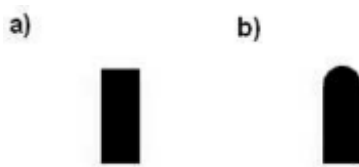
Každý výrobce má svá návrhová pravidla, která dodržuje. Tato pravidla pochází z norem IPC a JEDEC. Pouzdro QFN má lepší elektrické vlastnosti než jiná pouzdra typu QFP nebo PLCC.

Podle tvaru rozlišujeme pájecí plošky obdélníkové a plošky s kulatým zakončením na jedné straně pod pouzdrém. Plošky na pouzdře jsou menší než pájecí plošky na DPS. Je však potřeba respektovat typ pouzdra a pájecí plošky.

Pro dodržení návrhových pravidel pro pouzdra QFN je potřeba volit přesah. U typů E a „Punch“ se nastavuje přesah 0,05 mm na vnitřní straně a 0,2 mm na vnější straně u obdélníkového tvaru. Může se volit i větší přesah a to 0,4 mm.

U typu S s roztečí 0,65 mm se zvětší šířka o 0,05 mm. Menší rozteče mají stejnou šířku kontaktu na DPS jako na pouzdře, z důvodu prevence proti vytváření můstků. To souvisí i s minimální vzdáleností mezi kontakty 0,2 mm a mezi kontakty a termální ploškou 0,15 mm.

Kontakty s kulatým zakončením vnitřní ani boční přesahy nemají. [12] [25]



Obrázek 7: Tvary pájecích plošek na DPS: a) obdélníkový; b) s kulatým zakončením [12]

Ploška pro odvod tepla

Vlivem nepájivé masky se volí velikost termální plošky na DPS stejně velká, jako na pouzdře nebo menší o 0,65 mm.

Obvod, který je připájen, odvádí teplo z čipu přes pouzdro sáláním vzhůru nebo pomocí tepelných prokův do DPS. Umístění tepelných prokův v DPS je mezi vrchní a vnitřní měděnou vrstvou. Teplo se rozloží do desky a je lépe odváděno. Průměr prokovu se doporučuje 0,3 mm nebo méně s roztečí 1 mm. Zapojení prokův se nedoporučuje kvůli vysokým nákladům na výrobu a to i přesto, že by se zabránilo ztrátě pájky a zlepšily se tepelné vlastnosti. Prokovy mohou být použity v měděné oblasti mimo definované tepelné plošky. Při špatném a nekvalitním provedení DPS dochází ke zhoršení tepelných vlastností (vodivost). Dochází ke ztrátě pájky a nerovnostem při nesprávném použití velikostí vnitřních prokův a šablony na otvory.

Provedení nepájivé masky máme SMD a NSMD. Preferuje se typ nedefinované pájecí plošky nepájivou maskou, kdy mezera je volena mezi 0,06 – 0,075 mm. Je možné vytvořit i nepájivou masku mezi jednotlivými kontakty (ploškami) a to pro rozteče > 0,65 mm. [12] [25]

2 PÁJENÍ PŘETAVENÍM A PÁJENÝ SPOJ

Z důvodu používání menších součástek je nejvíce používaná metoda pájení přetavením. Základní technologický postup je osazování součástek do pájecí pasty, která je nanesena na vodivou plochu a která se přetaví při teplotě vyšší než je bod tání pájky obsažené v pastě. Vychází se z tiskových metod pro nanášení tlustovrstvých materiálů. Při procesu pájení jsou součástky povrchovým napětím vycentrovány na plošky DPS. Důležitým faktorem je teplotní profil představující průběh teploty na čase po dobu pájení. [19] [23]

Tento typ má mnohé výhody: [14] [19]

- aplikace pouze na místa, kde je třeba pájecí pasta
- úspora materiálu a přesně definovaný poměr pájky a tavidla
- bez teplotních šoků => menší namáhání součástek
- vyšší hustota montáže
- možná oboustranná montáž SMD

2.1 Druhy přenosu tepla

Pro přetavení pájecí pasty používáme všechny způsoby přenosu tepla:

- vedením (kondukce)
- prouděním (konvekce)
- zářením (radiace)

Vedením

Každá látka je charakterizována teplotou, která je mírou tepelného pohybu částic. Když se dvě látky těsně dotýkají a mají rozdílné teploty, předávají si energii částic teplejší látky do látky chladnější. Tento přenos energie je hlavně u pevných látek, kapalin a plynů. Tepelný tok Φ patří mezi základní veličiny související s vedením tepla. Je to množství tepla procházející plochou S za určitý čas. Přes tuto metodu se realizuje přenos tepla z pouzder součástky/spoje na substrát. Podmínkou je existence spojitého látkového prostředí. Proto ve vakuu vedení tepla nenastane. [19] [23]

$$\Phi = \frac{\lambda * S * \Delta T}{L} \quad (1)$$

kde

Φ - tepelný tok (W)

λ - tepelná vodivost materiálu ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)

S - plocha, kterou prochází teplo (m^2)

$\Delta T/L$ - teplotní gradient (Km^{-1})

Prouděním

Přenášení tepla se uskutečňuje pohybem celého souboru molekul kapaliny či plynu, k němuž dochází tehdy, když částice mění v prostoru svoji polohu a unášejí svou energii s sebou. Patří mezi intenzivnější přenosy tepla než šířením tepla vedením. Přenos tepla prouděním se děje i za pomoci energie, předávané z přenosu tepla vedením. Existuje proudění přirozené a nucené.

Přirozené proudění – nastává v kapalinách či plynech působením gravitačních sil tam, kde je větší hustota teplotního media.

Nucená konvekce – nastává tam, kde je třeba větší přenos tepla. Ohřátý vzduch je vytvořen pomocí čerpadel a ventilátorů. Proudění může nastat i proti teplotnímu spádu a je možné jím chladit. [19] [23]

Zářením

Je to přenos tepla pomocí elektromagnetického vlnění (záření) a to i ve vakuu a nevyžaduje látkové prostředí. Množství tepelné energie Φ přenesené radiací mezi dvěma tělesy teploty T_1 a T_2 lze vyjádřit rovnicí: [19] [23]

$$\Phi = S * A * \varepsilon * k * (T_1^4 - T_2^4) \quad (2)$$

kde

Φ - množství tepelné energie

ε - koeficient vyzařování

k - Stefan-Boltzmanova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8} (\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$

A - je obsah plochy tělesa (m^2)

S – faktor zastínění v rozmezí 0 až 1

T_1, T_2 – teploty

Sdílení tepla zářením není uplatňováno na hmotné prostředí, proto se může objevit i ve vakuu.

Ve skutečnosti jsou výše popsané mechanismy uplatňovány společně a k ochlazování součástek dochází současně vedením (odvod tepla do substrátu), prouděním (proudící vzduch v okolí pouzdra) a vyzařováním energie z povrchu pouzdra do okolí.

2.2 Přehled metod pájení přetavením

- konvekční pájení
- pájení infračerveným zářením
- kondenzační metoda
- pájení pomocí laseru

Konvekční pájení

Konvekční pece využívají nucené a nenucené konvekce. Průchodem plynu přes topné elementy se získává potřebná energie pro přetavení pájecí pasty. Zdroje tepla jsou topné články. Teplo se získává z ohřátého média pomocí ventilátorů. V rámci jednotlivých zón lze měnit teplotu případně intenzitu proudění plynu. Pro bezolovnaté pájení se doporučuje 12 zón horních tak i dolních. Čím větší počet zón, tím větší předpoklad lepšího nastavení teplotního profilu (homogenní ohřev, nízké teplotní gradienty a rozdíly teplot). Nesmí docházet k vzájemnému ovlivňování. Zařízení se vyrábějí s pohyblivým dopravníkem, kde se umísťuje DPS. Doporučení znečištění kyslíkem se pochybuje kolem 10 ppm. [19]

Výhody:

- vyhovují požadavkům VV DPS a mají menší zastínění jednotlivých součástek
- jednoduché nastavení pájecího profilu
- vynikající pro pájení pouzder BGA a QFN
- minimalizují se rozdíly způsobené barvou součástek

Nevýhody:

- menší účinnost a větší energetická spotřeba
- větší oxidace pájecí pasty

Pájení infračerveným zářením

Proces, kdy montážní celky dostávají energii z IR zářičů pro přetavení pájecí pasty. Absorpce tepla je závislá na barvě povrchu součástky a vlnové délce záření. Při procesu nastává jev, kdy černé součástky jsou více zahřívány, než jsou místa s pájecí pastou. To má vliv na kvalitu pájení a tepelné namáhání součástek.

V infračervených pecích jsou zářiče umístěny nad i pod dopravníkovým pásem. Rozdělení zářičů je podle zón.

Nevýhody:

- nehomogenní ohřev
- teplotní odpor a teplotní kapacity součástek
- velký rozdíl teplot při měření příčného teplotního profilu
- nevhodnost pro pájení nové generace součástek typu BGA, QFN

Výhody:

- vysoká účinnost procesu (60 až 70 %) [19] [23]

Kondenzační pájení

Po přehřátí se DPS ponoří do nasycených par kapaliny na bázi uhlovodíku a dochází ke kondenzaci na chladnějších místech DPS. Uvolní se energie tepla, která zahřívá součástky i DPS do teploty, při které dojde k přetavení pájecí pasty. Teplota se postupně zvyšuje až na teplotu varu. Teplota varu je vyšší než teplota pájení. V celém procesu prostoru zařízení je konstantní teplota. Nyní se tato metoda používá bez freonů a splňuje požadavky na životní prostředí.

Výhody:

- není možné přehřát DPS (vhodné pro BGA pouzdra)
- kvalitní pájení u tlustších DPS s větší tepelnou kapacitou
- při procesu pájení není přítomen kyslík (nedochází k oxidaci)

Nevýhody:

- vysoká cena procesu a instalace pájkových preforem
- testování kompatibility kondenzující kapaliny s plasty

Pájení pomocí laseru

Přetavení pájecí pasty probíhá pomocí laserového paprsku. Výborné výsledky jsou dané přesným množstvím energie. Laser se používá spíše pro formování spojů speciálních vlastností. Základní částí je osazovací modul se zaměřovacím systémem, laser s optickým vláknem a systém pro směřování paprsku.

Výhody:

- minimální teplotní ovlivnění součástek
- flexibilita procesu a použití velkých pájecích teplot

Nevýhody:

- vysoká cena
- nízká rychlost (produktivita) [19] [23]

Vytvoření pájeného spoje a IMC vrstva (intermetalická vrstva)

Pájený spoj vznikne ve 3 hlavních fázích za působení spojovaných materiálů. A to:

- smáčením spojovaných ploch
- difúzí atomů pájky a kovů z povrchových úprav
- krystalizací spoje

Smáčení je první a velice důležitá fáze. V této fázi na sebe vzájemně působí atomy roztavené pájky a atomy na povrchu substrátu. V druhém kroku se atomy materiálů rozpouští a dochází k vzájemné difúzi atomů z jednoho materiálu do druhého. Poslední fáze je chladnutí spoje, kde dochází ke krystalizaci pájecí slitiny a začnou se vytvářet zrna slitiny.

Během procesu smáčení a roztékání pájky po povrchu, je mezikovové rozhraní nahrazováno spojitou přechodovou tzv. intermetalickou zónou (IMC). Intermetalická oblast je vytvořena procesy rozpouštění i difúze. Na rozhraní mezi kovy se formují chemické a fyzikální vazby. V okamžiku zahájení smáčení tuhého povrchu roztavenou pájkou se začne vytvářet difúzní zóna. Hnací silou je koncentrační gradient. Rozpouštění a přechod atomů tuhého kovu do roztavené pájky probíhá buď difúzí či prouděním.

Vytváření a růst intermetalické vrstvy (IMC) na rozhraní mezi mědí a pájkou ovlivňuje spolehlivost pájeného spoje. Na straně jedné je jejich přítomnost nezbytná tím, že vznikají v procesu chemické smáčení povrchu, které zajistí vyšší mechanické vlastnosti spoje. Na straně druhé jsou IMC vrstvy podstatně křehčí. Pokud jsou přítomny ve větší míře, redukují životnost pájeného spoje.

Přechodové oblasti kovu a pájky se často považují za jednu vrstvu nehomogenních intermetalických sloučenin, vzniklých při pájení. Jejich složení a metalografická struktura závisí na výchozích materiálech, na teplotě a době pájení a způsobu ochlazování.

IMC vrstva má výrazný vliv na pájitelnost, negativně ovlivňuje křehkost spoje, tím i pevnost a spolehlivost pájeného spoje. Nekvalitní vytvoření vazeb na rozhraní mezi pájkou a pájeným povrchem, teplotní cyklování a mechanické namáhání spoje vede ke snižování spolehlivosti pájeného spoje.

Bezolovnatým pájecím procesem dochází k vytvoření silnější IMC vrstvy ve srovnání s pájkou olovnatou. Příčina je ve větším obsahu cínu ve slitině SAC, vyšší pájecí teplotou a delší dobou pájení. [19]

2.3 Teplotní profil při montáži QFN

Správně nastavený profil při pájení je základním předpokladem pro spolehlivou a kvalitní produkci. Cílem je přesné monitorování rozložení teplot na DPS, součástkách v různých zástavbových hustotách při rozložení termočlánků na DPS. Obecně se termočlánky umísťují na horní, spodní straně DPS, do pouzder součástek a na vývody. Nesprávně nastavený teplotní profil, nesprávné skladování a nanesení pájecí pasty může způsobit vznik defektů ve výrobním procesu.

Teplotní profil je vždy potřeba optimalizovat podle typu pájecí pasty a montážního celku. Rozhodující parametry jsou:

- zástavbová hustota a rozmístění součástek
- tepelná vodivost substrátu
- typ pájecí slitiny a tavidla

Hlavními faktory, které je třeba nastavit a pozorovat, jsou vrcholová teplota T_p , prodleva nad liquidem TAL a teplotní gradienty ohřevu a chlazení. [19] [23]

Příčný teplotní profil

Na teplotní profil působí konstrukce pece a hustota DPS. Hlavní rys je nehomogenita přetaveného tunelu v příčném směru během pájení. Při náročnějších aplikacích je potřeba profil sledovat.

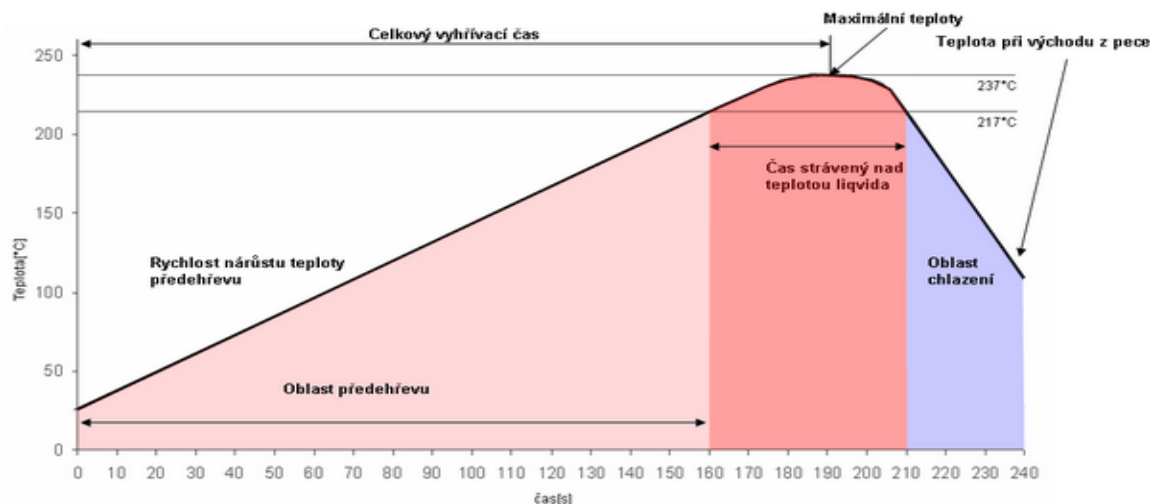
Podélný teplotní profil

Je charakterizován jako teplotní závislost na čase, která je měřena na DPS při průchodu tunelem. Hlavní využití je v kontrole a optimalizaci procesu nových typů DPS. Podélný teplotní profil má 4 oblasti:

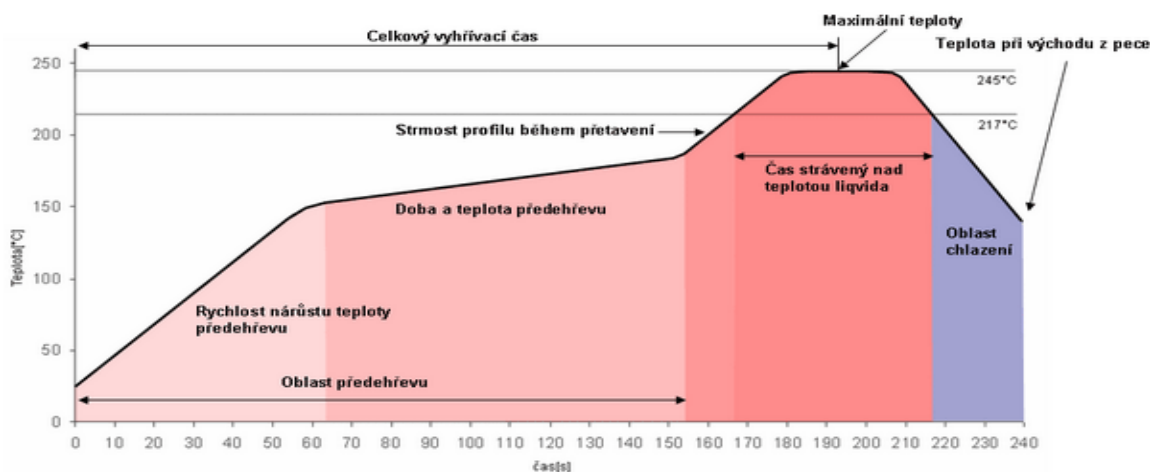
- předehřev (odpaření rozpouštědla aktivací tavidla)
- oblast vyrovnání teploty (předehřev součástek a substrátu)
- přetavení pasty (vytvoření pájeného spoje)
- chlazení

Nejvíce defektů vzniká v oblasti předehřevu pájecí pasty a to špatně nastavenou rychlostí nárůstu teploty.

Rozlišujeme dva možné teplotní profily a to RTS (Ramp to spike) a RSS (Ramp soak spike) profil. Preferován je RTS (Ramp to spike) profil. Dává jasnější a lesklejší spoje. Vyskytuje se méně problémů s pájitelností a má dobré smáčení. Redukuje energetické náklady, zvyšuje účinnost, redukuje pájecí defekty. [19] [23]



Obrázek 8: Podélný teplotní profil typu RTS [14]

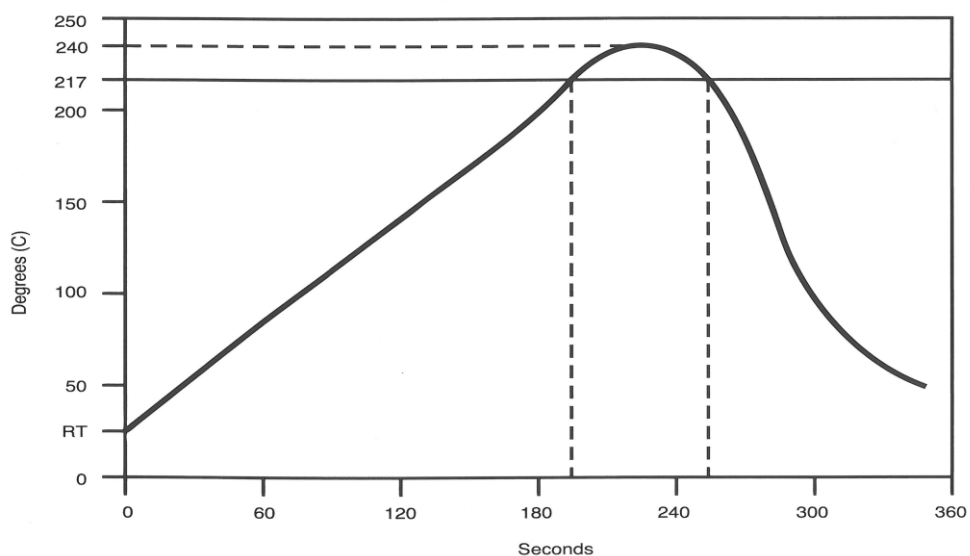


Obrázek 9: Podélný teplotní profil typu RSS [14]

Stejně jako u všech SMD součástek je důležité, aby teplotní profily byly monitorovány na všech nových typech desek plošných spojů. Pokud jsou na desce plošných spojů (DPS) rozmanité typy pouzder, teplotní profil by měl být měřen na více místech.

Teploty součástek se mohou lišit či kolísat kolem dané hodnoty, protože na ně působí i teploty okolních součástek, které jsou umístěny také na DPS, či hustota pouzder na DPS. Pro maximální samocentrování BTC („Bottom Termination Components“- dolní kontaktní ploška) je doporučeno, aby maximální teplota pájení byla specifikována pro každou pájecí pastu a nebyla překročena z důvodu možného přehřátí. Pro dobré vedení tepla je nezbytné, aby předmět na DPS nepřekročil hodnotu přehřátí 4 °C/s. Pro směrnice teplotního profilu při pájení přetavení jsou důležité teploty ve skutečné pájecí plošce umístěné na kontaktní plošce DPS v místě pájeného spoje.

Komerční BTC součástka může být kompatibilní ve zpracování s olovněnou nebo bezolovnatou pájkou při procesu pájení a dodavatel je odpovědný za stanovení maximálního limitu teplotního profilu (teplota součásti BTC je 215 - 245 °C).[8]



Obrázek 10: Teplotní profil pájecí pasty SAC podle IPC7093[8]

3 PRINCIPY MĚŘENÍ TEPLOTY

Teplota je základní stavová veličina, užívaná při hodnocení daného prostředí či stavu hmoty. Pro zjištění a měření teploty se používají teplotní stupnice. Základní jednotkou soustavy SI je jednotka Kelvin zn. K. Teplota se dá vyjádřit také Celsiovou stupnicí zn. °C. Měření teploty se provádí při vzájemném styku měřeného tělesa a srovnávacího tělesa. Po srovnání vzájemných teplot se vyčte teplota ze srovnávacího tělesa, neboli z teploměru. Pro měření teploty existuje několik druhů zařízení, které rozdělujeme, zda dojde ke kontaktu měřicího zařízení s měřenou látkou (kontaktní a bezkontaktní) a podle fyzikálních veličin. [2] [10] [11]

Základní rozdělení teploměrů [2] [10] [11]

Teploměry dotykové – čidlo je v kontaktu s měřeným povrchem. Musí se dbát na správné připevnění a fixaci.

- Dilatační teploměry
- Odporové teploměry
- Termočlánky

Teploměry bezdotykové – využívá se vyzařování infračerveného záření z měřeného objektu.

- Pyrometry
- Termovizní kamera

Pro účely diplomové práce se více zaměříme na termočlánky s profiloměrem a termovizní kamery.

3.1 Termočlánky

Termočlánek je nejrozšířenější teplotní čidlo, které slouží ke snímání teploty. Slouží a je vhodný pro zaznamenání teplot při optimalizaci teplotních profilů. Patří mezi teploměry dotykové. Je to zařízení, které je složené ze dvou rozdílných kovů zapojených do jednoho bodu (série). Princip je založen na termoelektrickém jevu (Seebeckův jev). Když dva kovy mají rozdílnou teplotu, vzniknou na daných spojích různé potenciály a začne procházet obvodem elektrický proud. Citlivost je v řádech desítek $\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$. Termočlánky jsou normalizovány. Doporučuje se používat termočlánky dle normy IEC 584-1. Máme několik druhů lišících se barevným a písmenným označením. K měření teplotních profilů se nejčastěji používají termočlánky typu J a K. [3]

Teplotní profiloměr

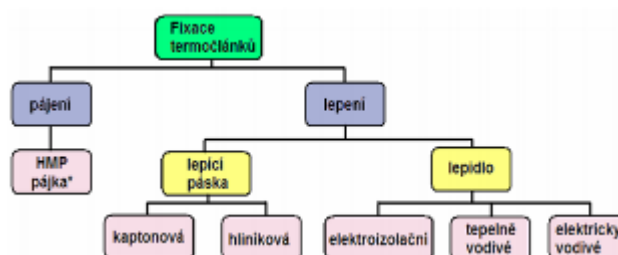
K měření teplotního profilu se používá teplotní profiloměr se 3 – 9 kanály, na kterém jsou připojeny termočlánky. Měřená data se zaznamenávají do paměti RAM profiloměru a poté přenášejí do počítače. Pro přenos dat z profiloměru do počítače se využívá RS 232, IR nebo radiových frekvencí. [19]

Tabulka 1: Termočlánky a jejich vlastnosti [2] [7] [14]

Materiál a teplotní rozsahy termočlánků				
Typ	Materiál	Teplotní rozsah	Standardní přesnost	Výběrová přesnost
J	Železo - konstantan	0 °C až 750 °C	Více než 2,2 °C nebo 0,75 %	Více než 1,1 °C nebo 0,4 %
K	Chromel - alumel	- 200 °C až 1250 °C	Více než 2,2 °C nebo 0,75 %	Více než 1,1 °C nebo 0,4 %
E	Chromel - konstantan	-200 °C až 900 °C	Více než 1,7 °C nebo 0,5 %	Více než 1 °C nebo 0,4 %
T	Měď - konstantan	- 250 °C až 350 °C	Více než 1 °C nebo 0,75 %	Více než 0,5 °C nebo 0,4 %

Upevnění termočlánků

Nejdůležitější faktor pro přesné měření je upevnění a fixace termočlánku. Existuje mnoho způsobů. Nejvíce používané v praxi jsou kaptonové a hliníkové pásky, tepelně vodivá lepidla a pájka s vysokou teplotou tavení. Pájka se používá hlavně na místa, kde je kladen velký důraz na zachování kvality pájeného spoje a je zde obtížné použít jinou fixaci termočlánku. [3]



Obrázek 11: Přehled způsobů fixace termočlánku [3]

Pájka [21]

Výborná spolehlivost a schopnost vydržet několik projetí pájecí pecí. Termočlánky zůstanou na svých pozicích, nedojde-li ke zvýšení teplot při měření nad hodnoty teploty tavení pájky.

Hliníková páska

Jednoduché použití a odstranění bez procesu zapájení na vývod. Nenechává žádné nečistoty. Po projetí pecí dochází obvykle k lehkému odlepení z povrchu měřené části (součástky) a je potřeba lidský zásah. Výchyly jsou minimální.

Kaptonová páska

Její hlavní přednost je chemická a teplotní odolnost. Odolává různým kyselinám a velkým teplotám při krátkodobém užívání. Je jednoduchá a cenově dostupná. Nenechává žádné nečistoty. Není však tak spolehlivá jako předchozí. Dochází u ní často k odloupení od povrchu měřené součástky po projetí přetavovací pecí.

Epoxidové lepidlo

Jednoduchá manipulace. Spoje jsou velmi křehké. Používá se tam, kde není možno aplikovat pájku či pásku.

3.2 Termografie

Termografie je obor, který se zabývá měřením rozložení teplot na povrchu daného tělesa. Patří mezi bezdotykové teploměry. Pomocí infračervených kvantových detektorů snímá infračervené záření, které není možné vidět lidským okem. Je to část elektromagnetického spektra, které vnímáme jako teplo. Data jsou termovizním systémem zobrazena ve formě termogramu, který můžeme pozorovat na monitoru termovizní kamery či na PC po přenosu dat. Lze zobrazit nejteplejší a nechladnější místo na měřeném vzorku. Termogramy můžeme rozdělit na radiometrické a zobrazující. Zobrazující termogramy se využívají ke sledování. Radiometrické termogramy slouží ke kvantitativnímu vyhodnocení testovaných vzorků a obsahují data o naměřené a vypočítané povrchové teplotě.

Využívá se například ve stavebnictví, kde se vyhledává únik tepla, ve zdravotnictví, kde se detekují záněty a nádory pod kůží. V průmyslu můžeme měřit mechanické namáhání strojů. V případě této práce podává informace o rozložení teplot na DPS. [2] [10]

Termovizní kamera Guide EasIR - 9

Práce využívá infračervenou kameru značky Guide EasIR - 9, která má vysoký výkon za nízkou cenu. Je navržena pro obtížné pracovní prostředí, je robustnější, odolná proti nárazům a lehká pro uživatele začátečníky. Kamera je vybavena směřováním obrazů. Umožňuje překrýt termosnímek přímo odpovídajícím optickým snímkem. Funkce Auto focus umožňuje automaticky zaostřit infračervený snímek a optické snímek pomocí jednoho tlačítka. K uložení snímku využívá SD kartu.



Obrázek 12: Termovizní kamera Guide EasIR - 9

Parametry:

Typ detektoru:	nechlazený mikrobolometr FPA (387x288 obrazových bodů)
Spektrální rozsah:	8 – 14 μm
Teplotní citlivost:	$\leq 100 \text{ mk}$ při 30 °C
Ostření:	manuální
Externí displej:	TFT LCD, 3,6 palců s vysokým rozlišením
Teplotní rozsah:	-20 °C do 250 °C; 10 °C - 50 °C (lékařská verze)
Přesnost:	$\pm 2 \text{ °C}$ nebo $\pm 2 \text{ °C}$ snímání
Vlastnosti měření:	Automatická korekce na základě vzdálenosti, relativní vlhkosti, rosnému bodu, externí optiky a propustnosti.

4 METODIKA MĚŘENÍ A SIMULACE

4.1 Měření teplotních profilů a snímání termovizní kamerou

Pro testování metod měření teploty byly použity testovací DPS s QFN pouzdry z firmy Honeywell (SM10019, IO37102 a SD4962DM3037), termočlánky typu K, přetavovací pec DIMA SMRO-0180 (VUT) a termovizní kamera Guide EasIR – 9 (laboratorní účely VUT).

Pro měření teplotního profilu a snímání termovizní kamerou byl zvolen následující postup: Nejprve se provede upevnění termočlánků na testovací DPS. viz kap. 5. 1. 1. Nastaví se hodnoty teplot IR zářičů v přetavovací peci DIMA SMRO-0180 a také rychlost dopravníku. Parametry: Horní infračervený zářič (dále IR zářič) = 300 °C, dolní IR zářič = 300 °C, IR zářič pro přetavení = 400 °C, rychlost dopravníku = 10. Spustí se software SLIMKIC 2000

a nastavíme požadované rozmezí hodnot pájecí pasty dle výrobce. viz. příloha 3. Konkrétně jde o parametry: Gradient nárůst teploty $\leq 2,5$ °C/s, gradient chladnutí ≤ 4 °C/s, čas přehřevu (25 °C - 150 °C) 0 – 90 s, vrcholová teplota 230 - 245 °C a TAL 217 °C (čas nad teplotou 217 °C) 40 – 70 s. Termočlánky typu K se připojí do dataloggeru a testovací DPS se položí na dopravník. Software zaznamenává postupně měřený teplotní profil testovací DPS až do projetí všech zón pece. Vyhodnocení a optimalizování teplotního profilu bude dosaženo pomocí indexu procesního okna (dále PWI). Optimální hodnota PWI je mezi 0 – 99 %.

Po vyhodnocení nastavíme optimální hodnoty teplot IR zářičů dle parametrů dosažené nejlepší hodnoty PWI. Z testovací DPS se odeberou termočlánky a vyčistí se testovací DPS od zbytků lepidla a hliníkových a kaptonových pásek. Z optimalizovaného teplotního profilu se určí časy, kdy provedeme snímání termovizní kamerou. Časy byly zvoleny kolem 100 s, 150 s, 200 s a 250 s z důvodu zobrazení rozložení teplot všech fází teplotního profilu (přehřev, přetavení, chlazení).

Spustíme termovizní kameru Guide EasIR – 9 a nastavíme počáteční parametry. Nastavené parametry jsou: teplota okolí 25 °C, vzdálenost kamery od pozorovaného objektu 0,2 m a emisivita 0,9. Optimální zaostření na měřený objekt provádíme ručně před začátkem každého měření. Rozměry a tvar přetavovací pece DIMA SMRO-0180 nám nedovolí umístění termovizní kamery přímo nad měřený objekt. Jeho upevnění na poklop či dovnitř pece by bylo z hlediska rozměru a hmotnosti kamery náročné.

Snímání termovizní kamerou provedeme následovně. Ve spuštěném programu SLIMKIC 2000 sledujeme teplotní profil a v určeném čase (např. 150 s) zvedneme poklop pece a termovizní kamerou se provede snímání části testovací DPS s hlavním soustředěním na QFN pouzdro a jeho okolí. Po změření a vyfocení zavřeme poklop, následně se zapíše čas teplotního profilu pro porovnání hodnot teploty. Zvednutí pece by mělo trvat v průměru 10 až 12 s. Poté celý úkon opakujeme v dalších určených časech až do konečné zóny chlazení.

Konečné zpracování snímku a zjištění teplot na určitých místech (např. povrch QFN pouzdra) se provádí v softwaru Guide IrAnalyser. Výsledky a porovnání je uvedeno v kapitole 5.1.

4.2 Pozorování a vyhodnocení pájeného spoje

Příprava vzorků mikrovýbrusů

Postup při zalévání vzorku a přípravě mikrovýbrusu.

- oddělíme sledovanou část DPS,
- na stěnu a dno zalévací formy nanese tenkou vrstvu separátoru.
- do nádoby dáme odpovídající poměry obou složek technického dentacrylu a provedeme homogenizaci pomocí tyčinky.
- upevníme vzorek odpovídajícím způsobem do formy a zalijeme vzorek dentacrylem.
- necháme vzorek zalitý dentacrylem polymerovat. Tuhnutí trvá několik hodin při 25 °C.
- vyjmeme vzorek ze zalévací formy a provedeme oplach vodou.
- pomocí brusné jednotky a pod malým proudem tekoucí vody provedeme broušení vzorku na hrubozrnném papíru, typ 200 a poté jemnozrnném papíru typ 600. Dokončíme typem 1200.
- oplach deionizovanou vodou
- leštění provedeme na plstěném kotouči a pomocí IPA. Leštíme cca 5 - 10 minut s leštící pastou
- poté se využije mikrolept. Vzorek dáme do mikroleptu na cca 5 - 10 s a oplach
- vzorek opláchneme vodou a provedeme vizuální kontrolu.

Optický mikroskop

Využívají k zobrazování soustavou čoček, pro něž platí zákony světelné optiky. Kromě omezeného zvětšení nemá optický mikroskop žádné zvláštní nevýhody, naopak jeho předností je snadná obsluha a údržba. Zvětšení mikroskopu se mění po skocích (od desetinásobného po tisícínásobné). Na rozdíl od lupy se mikroskop skládá ze dvou optických částí, funkčně i stavebně oddělených a odlišných – objektivu a okuláru. *Objektiv* je soustava čoček umístěná poblíž pozorovaného předmětu (objektu). Při průchodu objektivem vytvoří světelné paprsky v mikroskopu skutečný zvětšený převrácený obraz předmětu. *Okulárem* pozorujeme tento obraz jako lupou - okulár je tedy soustava čoček pro pozorování obrazu vytvořeného objektivem. Při pohledu do okuláru mikroskopu pozorujeme zvětšený neskutečný převrácený obraz předmětu. [9]



Obrázek 13: Optický mikroskop Olympus SZ61

Elektronový mikroskop

Rastrovací elektronový mikroskop s wolframovou žhavenou katodou je plně řízený počítačem, určeným pro práci s vysokým i nízkým vakuem v komoře mikroskopu. Vynikající elektronově - optické vlastnosti, neblikavý obraz s vysokým jasnem a brilancí a plná automatizace jsou charakteristické vlastnosti přístroje. Důmyslný, plně lokalizovaný software pro řízení mikroskopu a pořizování snímků pracující v prostředí Windows™, standardní formáty ukládaných obrázků, dokonalý systém pro archivaci, zpracování a vyhodnocování snímků, automatizované nastavování mikroskopu představují standardní výbavu tohoto přístroje.

VEGA3 XMU

Model s extra velkou komorou s nastavitelným vakuem v komoře vzorku. Možnost práce jak ve vysoko - vakuovém, tak nízko-vakuovém módu až do 500 Pa (volitelně až do 2000 Pa). V nízko - vakuovém módu lze pozorovat nevodivé preparáty bez nutnosti pokovení povrchu. [26]



Obrázek 14: Elektronový mikroskop VEGA3 XMU [26]

Rentgenová kontrola [16] [19] [6]

Používá se pro části DPS, které nelze zobrazit opticky. Sledují se strukturální chyby. Kontrola je založená na využití transmisní metody kontroly. Fokuseované rentgenové záření prochází přes objekt a vyhodnocuje se intenzita proniknutého záření. (využití hlavně u vícevrstvých DPS a pod QFN, BGA pouzdry) Využívají se dvě metody a to 2D a 3D, laminární metoda s prostorovým vyobrazením jednotlivých vrstev. Systémy se dělí na dvě základní skupiny:

- Transmisní rentgenové systémy

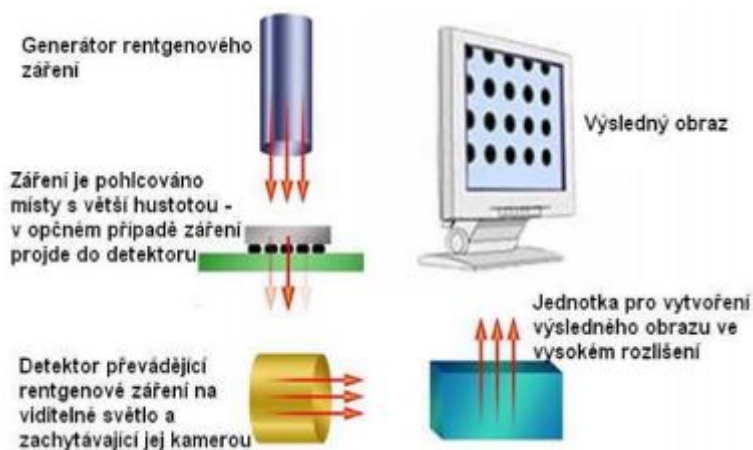
Systém pronikne pouzdrem a umožní pohled na nedostatky a chyby vzniklé při pájení. (např. zkratky). Jsou omezeny při měření rozměrů a také jsou méně efektivní při kontrole oboustranných DPS. Také v přítomnosti olovnaté pájky na kontrolovaném objektu mají omezené schopnosti snímání a kontroly. Je levný na rozdíl od průřezových rentgenových systémů.

- Průřezové rentgenové systémy

Snímky se pořizují z určitého úhlu a vytváří ohniskovou rovinu na kontrolované rovině spoje. Systémy zobrazují pořizené snímky v odstínech šedi, které představují změny v tvaru a tloušťce objektu. Tmavší barvy jsou místa s vysokou hustotou.

Hlavní výhodou je možnost objevení chyby v pájených spojích, které nemají žádný vizuální přístup a také u pájených spojů, které jsou nespolehlivé a které mohou lehko uniknout funkčním i ICT testům.

Hlavní nevýhodou je cena a vysoká náročnost na zobrazovací rozlišení obrazu.



Obrázek 15: Ukázka rentgenové kontroly [6]

4.3 Modelování v Solidworks

SolidWorks nabízí nám objemové i plošné modelování, práci se sestavami námi vytvořené a automatické generování výrobních výkresů. Nabízí přehledné a intuitivní pracovní prostředí, které inovativně kombinuje moderní ovládací prvky se systémy roletových menu. Ovládání je založené na technologii SWIFT, která redukuje potřebu opakujících se úkonů a manuálních zásahů. V systému lze vkládat do sestav součásti a definovat jejich polohu pomocí vazeb. Součásti, které nemají pomocí vazeb definované všechny stupně volnosti, je možné tažením myši přemístit a jednoduše tak ověřit pohyb mechanismů.

SolidWorks Flow Simulation umožňuje simulovat proudění kapalin, plynů a to jednoduše a hlavně rychle. V nejvyšší verzi SolidWorks flow simulation jsou obsaženy rozšiřující funkce např. analýza přestupu tepla. Je zde možný výpočet toku tepla a také výpočet radiačního tepla, možnost zvolení různých druhů tepelných zdrojů. Široká databáze materiálů je uložena v inženýrské databázi. Lze určit uživatelské materiály přiřazením hodnoty fyzikálních vlastností, jako jsou tepelná vodivost, tepelná kapacita atd. [27]

MKO (metoda konečných objemů)

Numerická metoda konečných objemů funguje na principu vytvoření systému elementů konečných objemů, které se nepřekrývají. Rozdělí se na konečný počet tzv. kontrolních objemů pomocí sítě, které nazýváme grid, mesh. K popisu prostředí metoda využívá základní rovnice kontinuity, pohybové atd. Rovnice jsou poté diskretizovány do soustav algebraických rovnic. Do integrálních tvarů rovnic poté aproximujeme vhodným způsobem jednotlivé členy. Systém pracuje s vnitřním objemem prvku a výsledky se přenáší přes stěny prvku. [22] [27]

MKO z praktického hlediska spočívá na:

- rozdělení simulované oblasti na kontrolní objemy s využitím křivočaré sítě
- bilance neznámých veličin v kontrolních objemech a diskretizace
- vyřešení diskretizovaných rovnic

Důležité faktory určující rychlost výpočtu:

- počet kontrolních objemů v řešené oblasti
- rozložení sítě kontrolních objemů v řešené oblasti
- počet rovnic zahrnutých do matematického modelu
- výkon výpočetního systému

Tvorba sítě

Síť představuje systém rozdělení výpočtové oblasti na dílčí na sebe navazující 2D buňky ve dvoudimenzionálním prostoru nebo 3D buňky ve třídimeznionálním prostoru. Samotný matematický model je pouze pasivním nástrojem, dokud se neaplikuje na konkrétní problém. Platí zde několik zásad → výpočet je o to náročnější: [22] [27]

- čím více rovnic je v rámci matematického modelu do výpočtu zahrnuto
- čím více má výpočtová oblast buněk
- čím méně kvalitní je síť výpočtové oblasti

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Metoda měření teploty

Pro návrh metody měření teploty na produkčních DPS byly porovnány a testovány zástupci z dotykových a bezdotykových teploměrů, které se nejčastěji vyskytují v praxi. Jsou jimi termovizní kamera a termočlánky typu K. K porovnání těchto metod byl využit teplotní profil bezolovnaté pájecí pasty AIM NC257-2. Viz. příloha 3. Pro ukázkou porovnání metod byla vybrána DPS č. SM10019.

Pro měření tepelného profilu byla využita přetavovací **IR pec DIMA SMRO-0180**, která je navrhnutá a používána pro laboratorní účely na VUT. Má 2 tepelné zóny a to zónu pro předehřev a zónu pro přetavení. Jsou zde 3 topné infračervené zářiče. Pec obsahuje také dopravník, kterým řídíme rychlost pohybu. Přetavovací pec má nevýhodu v nehomogéním ohřevu shora i zdola.

K měření a zobrazení teplotního profilu na PC byl použit profiloměr SLIMKIC 2000. Profiloměr má možnost zapojit až 9 termočlánků. Pro měření bylo využito 3 termočlánků typu K pro každou testovací DPS.

Pro zobrazení rozložení teplot kolem QFN pouzdra byla použita termovizní kamera Guide EasIR – 9 . Informace viz. kapitola 3.2..

5.1.1 Umístění a připevnění termočlánků

Kvalitním rozmístěním a fixací termočlánků dosáhneme přesnějších výsledků při měření teplotního profilu. Termočlánky jsou umístěny na levou a pravou část nepájecí masky a na povrch pouzdra. Pro fixaci termočlánku byla využita kombinace hliníkové a kaptonové pásky pro zabránění odlepování po každém projetí pecí. Pro lepší manipulaci a zabránění odtržení termočlánku během procesu, byly termočlánky přilepeny k DPS tepelně vodivým lepidlem. Rozmístění termočlánku můžeme vidět na obrázku 16.

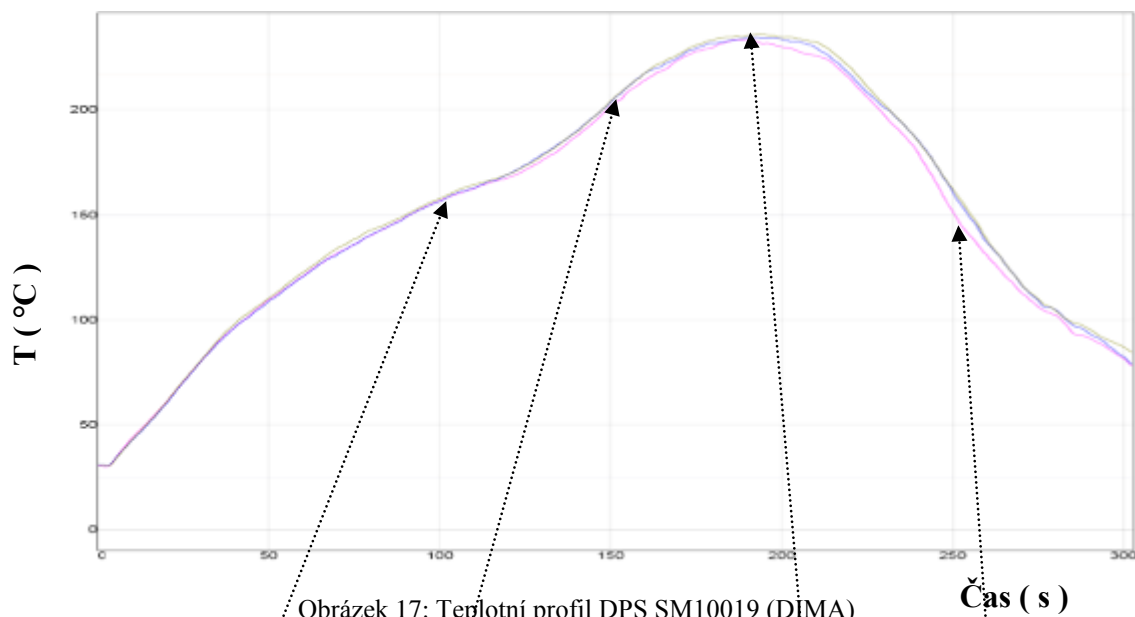


Obrázek 16: Rozložení a fixace termočlánků na DPS č. SM10019

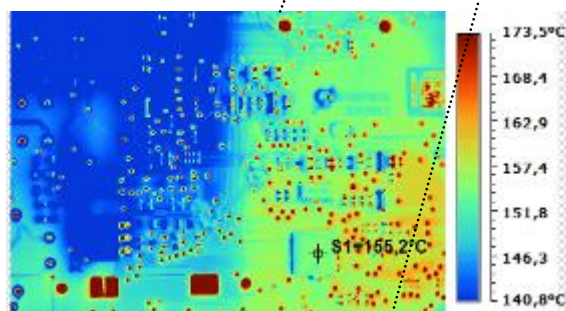
Označení termočlánku:

- Tč.1: Nepájecí maska na levé straně
- Tč.2: Povrch QFN pouzdra
- Tč.3: Nepájecí maska na pravé straně

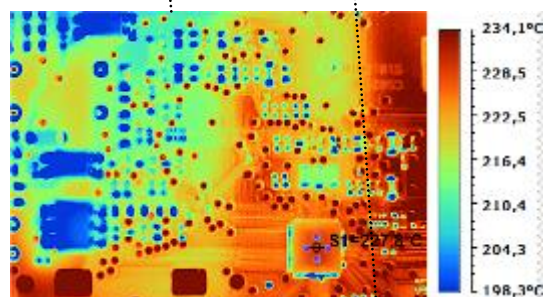
5.1.2 Pozorování produkční DPS č. SM10019 termovizní kamerou



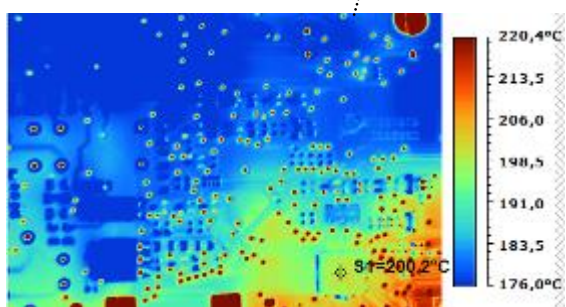
Obrázek 17: Teplotní profil DPS SM10019 (DIMA)



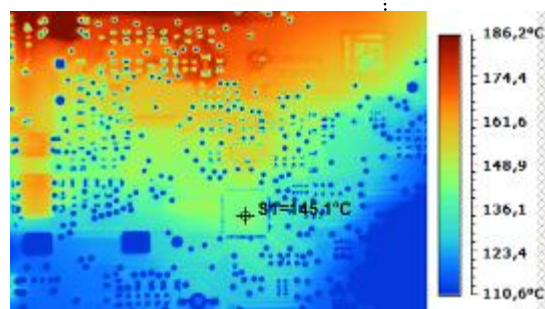
Obrázek 18: Rozložení teplot v čase 103 s.
T=155,2 °C (Zóna předehřevu)



Obrázek 20: Rozložení teplot v čase 191 s.
T=227,8 °C (Zóna přetavení)



Obrázek 19: Rozložení teplot v čase 156 s.
T=200,2 °C (Zóna vyrovnání)



Obrázek 21: Rozložení teplot v čase 251 s.
T=145,1 °C (Zónachlazení)

Tabulka 2: Hodnoty PWI pro DPS č. SM10019

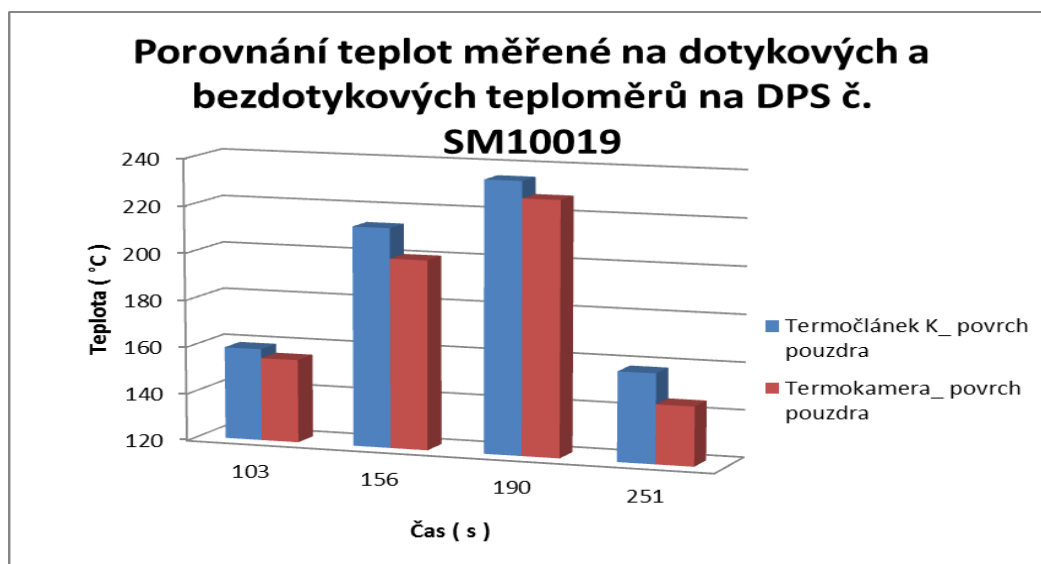
PWI= 102%	Max Rising Slope	Max Falling Slope	Preheat 25-150C	Peak Temp	Tot Time /217C
<TC1>	1.88 50%	-2.48 1%	91.10 102%	233.67 -51%	55.86 6%
<TC2>	1.91 53%	-2.42 5%	91.10 102%	234.76 -37%	60.58 37%
<TC3>	1.94 55%	-2.36 9%	89.96 100%	236.28 -16%	62.57 50%
Delta	0.06	0.12	1.14	2.61	6.71

5.1.3 Porovnání teplot naměřených termočlánkem a termovizní kamerou

Při měření a porovnání teplot se budou hodnotit rozdíl naměřených teplot na povrchu QFN pouzdra a náročnost měření daných metod.

V tabulce 2 jsou uvedeny dosažené a optimalizované časy, teploty a PWI teplotního profilu DPS č. SM10019. Dosažené PWI je 102 %. Dosáhnout lepšího PWI, menšího jak 100 %, se nepodařilo. Jedním z důvodů je bezolovnatá pájecí pasta AIM 257-2, která si žádá rychlejší nárůst teploty do 150 °C a konstrukce přetavovací pece DIMA SMRO-0180, která má pouhé 3 zóny. Další hodnocené parametry však vyhovovaly procesnímu oknu doporučenému od výrobce. Na obrázku 17 je zobrazený optimalizovaný teplotní profil DPS č. SM10019.

Na obrázku 18 - 21 vidíme přibližné rozložení teplot v okolí QFN pouzdra na DPS č. SM10019. Snímky byly pořízeny termovizní kamerou v časech teplotního profilu 103 s, 156 s, 190 s a 251 s.



Obrázek 22: Teploty měřené na termovizní kameře a termočlátku pro určené časy

Na obrázku 22 vidíme porovnání teplot měřené na termočlátku typu K a termovizní kameře. Z grafu vyplývá, že větší teploty vykazují termočláanky a to z následujících důvodů:

- termočlánek se po celou dobu měření dotýká měřeného objektu a je zafixován páskami (kapton, hliník)
- poklop pece se neotevívá a nedochází tak k většímu proudění vzduchu, který by termočláanky ochladil
- nemusí se zohledňovat odražené záření z okolního prostředí a případné špatné vyzařování předmětu infračervenou energií

Nehomogenita porovnaných a naměřených teplot termovizní kamerou je způsobena emisivitou, různou vzdáleností měřeného objektu od detektoru, teplotou okolí, velikostí

obrazového bodu detektoru a vlhkostí. To vše může ovlivnit naměřenou teplotu a způsobit chybu či nejistotu měření.

V případě měření termovizní kamerou na IR peci (DIMA SMRO-0180) se při zvednutí víka DPS ochladí z důvodu vniknutí vzduchu do prostoru pece a při oddálení IR zářičů už tak nepůsobí vyzařované teplo na měřený povrch. Na obrázku 18 - 21 si lze však všimnout vyšších teplot na pravé části snímku než na levé části. Je to dáno konstrukcí pece, kde při zvednutí víka jsou IR zářiče stále blízko a působí na DPS oproti druhé straně.

Rozdílné teploty se pohybují v rozmezí teplot $3,8 - 13\text{ }^{\circ}\text{C}$. U termovizní kamery je v současnosti standardní přesnost $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $\pm 2\%$ z naměřené hodnoty. Přesnost termočlánku K je více než $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $0,75\%$ z naměřené hodnoty. Pro speciální případy se bere přesnost více než $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $0,4\%$ z naměřené hodnoty. [18]

Výhody a nevýhody jednotlivých metod měření teploty a jejich shrnutí.

Termočlánek typu K

Výhody:

- cenově dostupnější
- nenáročné a jednoduché použití
- stálý kontakt s měřeným objektem

Nevýhody:

- zkreslené výsledky špatnou fixací termočlánku a měřeného objektu
- nemožnost měření rotujících a pohyblivých částí měřeného objektu
- možnost měřit teploty na předem určeném místě [10] [18]

Termokamera Guide EasIR - 9

Výhody: [10] [18]

- neovlivnění objektu měřicím přístrojem
- nezpůsobuje mechanické opotřebení měřeného objektu
- snadné měření rotujících a pohyblivých částí či rychlých změn teplot
- bezproblémové a rychlé snímání celého povrchu měřeného objektu
- snímky možno dále zpracovat a upravovat v softwaru dané kamery

Nevýhody: [11]

- možnost zkreslení naměřených hodnot při špatném nastavení emisivity
- možnost zkreslení špatným ručním zaostřením měřeného objektu
- zkreslení z důvodu nečistot (prach, kouř) měřeného objektu
- nemožnost měřit vnitřní teplotu měřeného objektu

Z daného měření a porovnání na DPS vyplývá, že pro potřeby diplomové práce se nejlépe hodí termočlánky. Termočlánky jsou méně náročné na způsob měření. V případě IR pece i v budoucím měření na konvekční peci Heller se nemusí zvedat víko pece a má větší rozsah měřitelných teplot. Nedochází ke většímu zkreslení měřených teplot z důvodu výše popsaných. [2]

5.2 Optimalizování teplotních profilů QFN pouzder na produkčních DPS.

Tato a následující část projektu probíhala ve spolupráci s brněnskou pobočkou firmy Honeywell. Pro formování spolehlivého pájeného spoje je nutné nejdříve u každého pájecího zařízení optimalizovat nastavení teplotních profilů. Většinou pro všechny testované či produkční DPS, protože každá DPS je svým způsobem originální. Procesní charakteristiky musí být nastaveny adekvátním způsobem pro materiálový systém součástek, který je na DPS (velikost součástek, typy pouzder, zástavbová hustota a tepelná kapacita DPS).

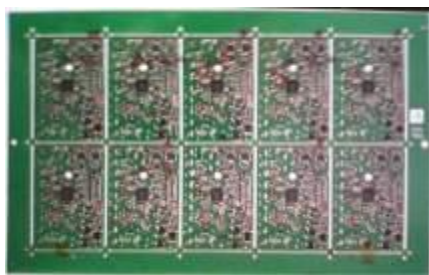
Optimalizace teplotního profilu skrývá řadu faktorů, které ovlivňují kvalitu zapájení. Např. homogenita tepla, kde rozdíl teplot na pouzdře a DPS by neměl přesáhnout 5 °C. Důvodem je dostatečné prohřátí a kvalitní zapájení pájených spojů. Další sledované parametry jsou vrcholová teplota, prodleva nad liquidem, teplotní gradienty ohřevu a chlazení.

Optimalizace byla provedena pro bezolovnatou pájecí pastu AIM NC257-2. Pasta je určena pro šablonový tisk. Viz příloha 3.

Cílem optimalizace profilu bylo získání pájecího profilu, který se bude svými parametry přibližovat k doporučeným parametrům od výrobce pájecí pasty a hodnotám normy IPC7093. Následně by se porovnaly teplotní profily dosažené pomocí horkovzdušné pece HELLER 1812 EXL, IR pece DIMA SMRO-0180 (VUT) a simulací v SolidWorks.

Produkční DPS

Optimalizování teplotních profilů byly použity určené testovací DPS s QFN pouzdry z firmy Honeywell (SM10019, IO37102 a SD4962DM3037). Všechny DPS jsou oboustranné. Tloušťka je pro všechny stejná 1,5mm. Délky pro DPS jsou: SM10019 = 25,3 cm, SD4962DM3037=25,5 cm a IO37102= 33mm.



Obrázek 23: Produkční DPS č. IO37102



Obrázek 24: Produkční DPS č. SM10019



Obrázek 25: Produkční DPS č. SD4962DM3037

Použité zařízení

Pro měření a optimalizaci teplotních profilů bylo použito zařízení konvekční (horkovzdušné) pec HELLER 1812 EXL (HONEYWELL), IR pec DIMA SMRO-0180 (VUT). Toto zařízení umožňuje pájení horkým vzduchem a infračerveným ohřevem. Více o IR peci viz. [kap. 5.1.](#)



Obrázek 26: DIMA SMRO-0180



Obrázek 27: HELLER 1812EXL

Konvekční pec HELLER 1812 EXL

Horkovzdušná pec obsahuje 12 topných a 2 chladicí zóny. Délka všech zón je cca 4 m. Může se nastavit rychlost dopravníku. Nejvíce využívané jsou rychlosti 75, 80, 85 cm/min. V každé zóně jsou větráky nahoře i dole a působí zde jako zdroj horkého vzduchu. Obsahuje vyspělý operační systém na bázi Windows se záznamem dat, záznam alarmů. Podle typu může pec obsahovat také řetězový dopravník (piny z boku) či roštový dopravník. Záleží na přání zákazníka.

Počáteční podmínky pro optimalizování teplotního profilu v peci HELLER 1812EXL

Fixace termočlánků viz [kap. 5.1.1.](#)

Umístění termočlánku

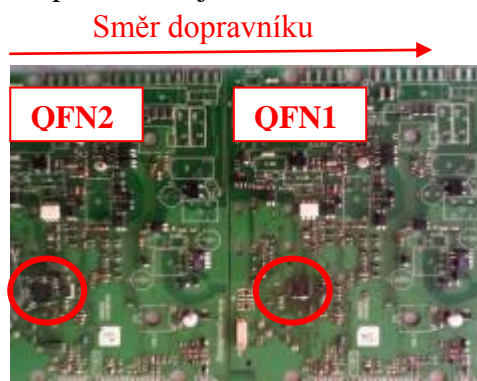
Označení termočlánku: Rozmístění termočlánků typu K pro DPS najdeme na obrázku 28.

První QFN pouzdro (pravé)

- Tč.1: Povrch QFN pouzdra
- Tč.2: BTC_tepelně vodivá ploška
- Tč.3: Dolní strana DPS (pod pouzdem)

Druhé QFN pouzdro (levé)

- Tč.4: Dolní strana DPS (pod pouzdem)
- Tč.5: Povrch QFN pouzdra
- Tč.6: BTC_tepelně vodivá ploška



Obrázek 28: Rozmístění termočlánku na DPS č. SM10019

Přehled nastavených teplot v jednotlivých zónách, rychlosti dopravníku a délky měření je v tabulce 3, 4 a 5. Teplotní profil byl pozorován ve 13 různých zónách pájecí pece, přibližně po 17 až 21 s v každé zóně. Záleží na typu DPS.

Tabulka 3: Nastavené teploty v zónách HELLER 1812 EXL pro DPS SM10019

Zóna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Teplota (horní)	100	115	130	145	160	180	190	210	235	255	265	215	100
Teplota (dolní)	100	115	130	145	160	180	190	210	235	255	265	215	215
Rychlost 75 cm/min			Teplota okolí 25 °C			Projetí DPS cca 5:30 minut							

Tabulka 4: Nastavené teploty v zónách HELLER 1812 EXL pro DPS IO37102

Zóna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Teplota (horní)	100	115	130	145	160	180	190	210	235	250	260	215	100
Teplota (dolní)	100	115	130	145	160	180	190	210	235	250	260	215	215
Rychlost 95 cm/min			Teplota okolí 25 °C			Projetí DPS cca 4:30 minut							

Tabulka 5: Nastavené teploty v zónách HELLER 1812 EXL pro DPS SD4962DM3037

Zóna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
Teplota (horní)	100	115	130	145	160	180	190	210	235	255	265	215	100
Teplota (dolní)	100	115	130	145	160	180	190	210	235	255	265	215	215
Rychlost 85 cm/min			Teplota okolí 25 °C			Projetí DPS cca 5 minut							

Pro proměření teplotního profilu byl využit profiloměr ECD SuperM.O.L.E.® Gold. Pro rychlé vyhodnocení naměřených dat a zjištění potřebných hodnot sloužil originální software M.O.L.E.® v.3.10.



Obrázek 29: Ukázka umístění DPS a dataloggeru před projetí pece

Tabulka 6: Typické hodnoty profilu pro SAC305 nebo SAC 405 IPC7093 [8]

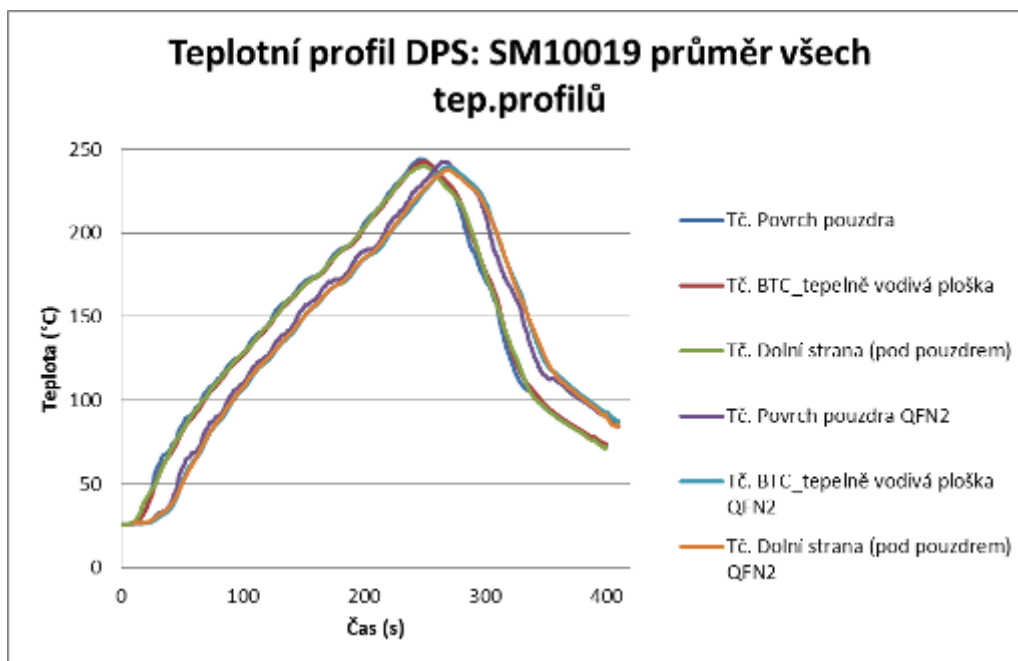
<u>Oblasti profilu</u>	<u>Konvekce nebo IR</u>
Nárůst teploty	0,8 - 1,2 °C/s
Prodleva nad liquidem pájky (217 °C)	35 - 80 s
vrcholová teplota	235 -240 °C (260 °C max)
Gradient chlazení	1 - 2 °C/s ; typické 6 °C/s max.

Tabulka 7: Typické hodnoty profilu pro pájecí pastu AIM NC257-2 [8]

Rychlost ohřevu 2 °C/s	Vzestup na 150 °C	Průběžný vývoj (vyrovnání) 150 °C - 170 °C	Vrcholová teplota 230 °C - 245 °C	Čas nad liquidem 217 °C	Gradient chlazení ≤4 °C/s	Délka profilu
Zkrácený profil	≤ 75 s	30 - 60 s	45 - 75 s	30 - 60 s	45±15 s	2,75-3,5 min
Dlouhý profil	≤ 90 s	60 - 90 s	45 - 75 s	60 - 90 s	45±15 s	4,5-5 min

V tabulce 6 jsou doporučené obecné hodnoty pro teplotní profil uvedené v normě IPC7093 pro pájecí pasty SAC305 a SAC405. V tabulce 7 jsou shrnuty nejdůležitější a doporučené parametry pro modelování pájecích profilů pájecí pasty AIM NC257-2 od firmy AIM solder. Hlavní parametr, který nesmíme porušit, je vrcholová teplota. Při teplotě od 250 °C dochází k tavení pouzder součástek, proto je velice důležité hlídat tuto teplotu.

5.2.1 Teplotní profily produkčních DPS – horkovzdušná pec HELLER



Obrázek 30: Teplotní profil DPS č. SM10019, HELLER 182 EXL

Tabulka 8: Naměřené hodnoty DPS č. SM10019 pomocí MOLLE

2. projekt	Gradient ohřevu	Čas mezi teplotami	Maximální teplota	Čas nad liquidem	Integrál teploty	Delta=rozdíl mezi teplotami Tč.	Delta = rozdíl vrcholových teplot	Gradient chlazení
	0-150	150-217 °C		217 °C	217-300 °C			
	(°C/s)	(s)	(°C)	s	(°C*s)	(°C)	(°C)	(°C/s)
Povrch pouzdra	2,56	91	244,4	64	1011	28	244	-3,2
BTC	2,11	90	242,8	65	980	28	243	-2,9
Dolní strana	1,67	87	240	67	887	28	240	-2,4
Dolní strana QFN2	1,5	88	238,9	63	758	34	239	-2,2
Povrch pouzdra QF2	2,39	91	243,9	65	950	33	244	-3,2
BTC QFN2	1,89	92	240	60	820	33	240	-2,4
Delta						6	5	
Rozdíl	1	5	6	7	253			1
Průměr	2	89,8	241,7	64	901			-2,7
Odchylka	0,41	1,94	2,32	2,37	97,93			0,45

Tabulka 9: Průměr všech změřených profilů DPS č. SM10019 pomocí a MOLLE

Průměr všech měření	Gradient ohřevu	Čas mezi teplotami	Maximální teplota	Čas nad liquidem	Integrál teploty	Delta=rozdíl mezi teplotami Tč.	Delta = rozdíl vrcholových teplot	Gradient chlazení
	0-150	150-217 °C		217 °C	217-300 °C			
	(°C/s)	(s)	(°C)	(s)	(°C*s)	(°C)	(°C)	(°C/s)
Povrch pouzdra	2,80	90,67	244,6	64,33	1022,00	27,33	244,33	-3,2
BTC	2,18	90,33	242,9	65,00	991,67	27,33	243,00	-2,8
Dolní strana	1,69	87,00	240,2	67,33	892,67	28,00	240,33	-2,4
Dolní strana QFN2	1,59	89,00	238,9	61,33	750,00	32,67	239,00	-2,2
Povrch pouzdra QF2	2,39	90,67	244,0	64,33	947,67	32,00	244,00	-3,0
BTC QFN2	1,98	92,33	240,2	59,67	820,67	32,00	240,33	-2,4
Delta						6	6	
Rozdíl	1,33	5,33	6,00	7,67	272,00			1
Průměr	2,10	90,00	241,8	63,67	904,10			-2,70
Odchylka	0,46	1,89	2,37	2,80	104,50			0,42

Na obrázku 30 je optimalizovaný pájecí profil pro DPS č. SM10019. Tvar profilu odpovídá RTS profilu. Má lineární tvar až do dosažení vrcholové teploty. Drobné roztřepání na Tč. pro měření povrchu pouzdra bylo zapříčiněno možnou nedokonalou fixací termočlánku hliníkovou a kaptonovou páskou. Z grafu jsou patrné menší teploty na povrchu pouzdra v oblasti chlazení. Důvodem je nastavení teplot v zóně pro chlazení. Na horním topném modulu je nastaveno 100 °C na rozdíl od dolního topného modulu, kde je nastaveno 215 °C.

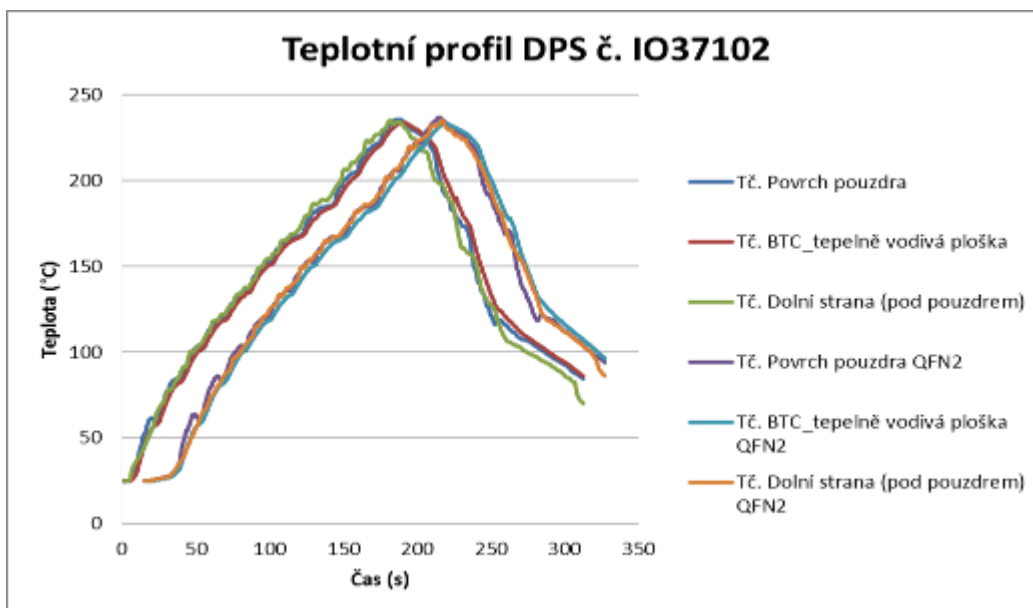
Měřené hodnoty a časy jsou uvedeny v tabulce 8 a 9. Všechny parametry odpovídají mezím pájecího profilu doporučeného výrobcem a hodnotami uváděné v normě IP7093. Maximální teplota na QFN pouzdru byla dosažena 245 °C. Minimální teplota byla dosažena 238,9 °C. Čas pro vyrovnání mezi teplotami 150 - 217 °C se pohyboval okolo 90 s. Čas nad teplotou 217 °C byl dodržen nad 60 s. Požadavek na homogenitu teplot mezi pouzdry QFN byl dodržen. Obecně platí, že rozdíl teplot by neměl přesáhnout 5 - 6 °C. V tomto případně rozdíl mezi termočlánky na QFN pouzdrech byl 6 °C. Rozdíl mezi vrcholovými teplotami byl 5 °C.

Výjimku tvoří gradient ohřevu při prvním projetím DPS na povrchu QFN pouzdra, který není v toleranci. Gradient ohřevu je vyšší tj. 3,22 °C/s místo maximální hodnoty uváděné výrobcem 2,5 °C/s. Důvodem je větší pohlcení tepla, protože dané QFN pouzdro vstoupilo do pece jako první a daná zóna mohla mít v ten moment větší teplotu, než bylo nastaveno.

Můžeme si také všimnout, že povrch pouzdra, jak na prvním, tak na druhém QFN, vykazuje větší gradient ohřevu, větší vrcholovou teplotu i integrál teploty („*integrál měřené teploty nad teplotou liquidu s ohledem na dobu prodlevy*“)[5] než ostatní měřené části. Je to dáno konstrukcí pece, kde horní topné moduly jsou blíže k DPS cca. 4 cm a působí na povrch pouzdra déle a intenzivněji než ostatní měřené části. Dolní strana DPS není tolik prohřátá z důvodu větší vzdálenosti topných modulů od DPS cca. 6 cm. Další příčina je daný proces, kdy horký vzduch nejdříve začne působit na povrch pouzdra, kde působí nejdéle a teplo se postupně dostává přes pouzdro a chip na BTC (tepelně vodivá ploška). Zde dochází ke snížení a ztrátám tepla z důvodů funkce BTC a to je chlazení.

Při zaměření na jednotlivá QFN pouzdra na DPS č. SM10019 si z tabulky č. 8 a č. 9 můžeme všimnout, že QFN1 pouzdro vykazuje větší hodnoty gradientu ohřevu a integrálu teploty než pouzdro QFN2. Je to dáno tepelnou kapacitou pouzdra QFN 1, který putuje do přetavovací pece jako první, a proto má větší teplotu a integrál teploty než následná studenější část desky s pouzdrem QFN2. Vzdálenost QFN pouzder na DPS č. SM10019 je 12,8 cm. Rozdíly teplot na QFN pouzdrech vyvážíme a srovnáme počtem zón v přetavovací peci.

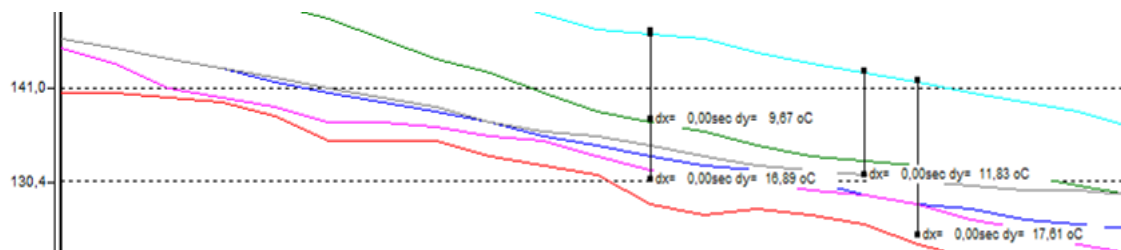
Můžeme si zde i uvést příklad, kdy při zapájení více DPS, v přetavovací peci, se nedoporučuje dát na dopravník více DPS za sebou, bez určitého intervalu či větší vzdálenosti od sebe. Důvodem je možné pohlcení tepla každou DPS a následné ochlazení uvnitř pece a tím pádem i DPS, které jsou teprve na začátku přetavovací pece.



Obrázek 31: Teplotní profil DPS č.IO37102, HELLER 182 EXL

Na obrázku 31 je zobrazen teplotní profil DPS č. IO37102. Daný průběh nevykazuje žádné větší výkyvy. Průběh ohřevu je lineární. Viditelné roztřepání teplotního profilu zapříčinila nedokonalá fixace termočlánu či rychlý přechod z jedné zóny do teplejší druhé zóny přetavovací pece.

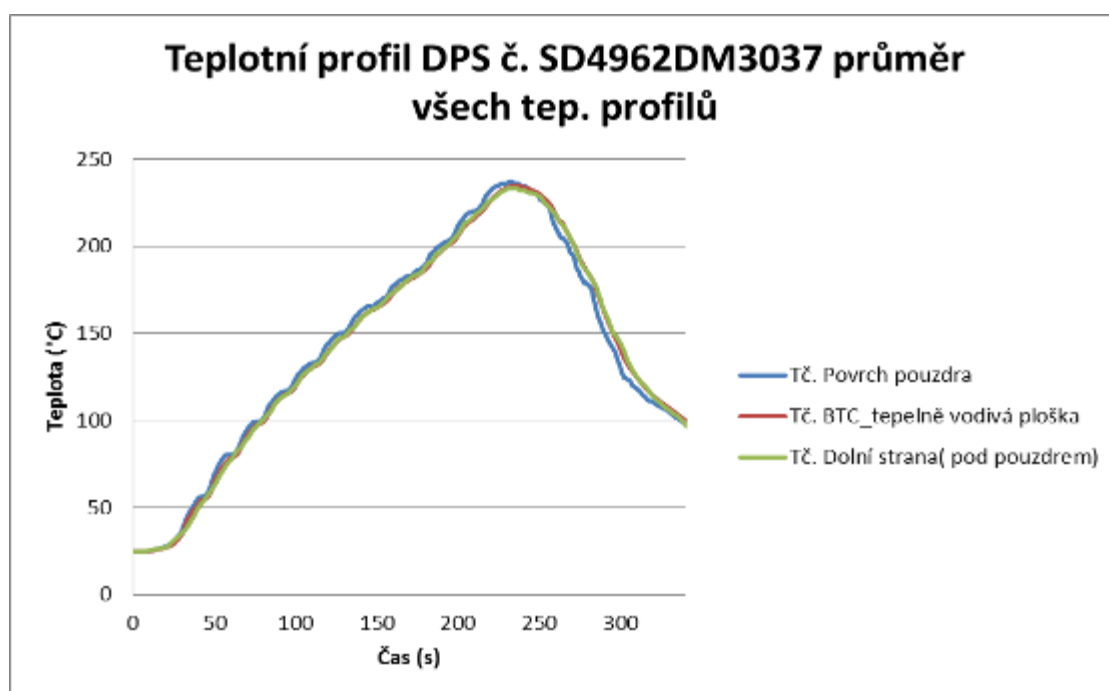
V tabulce 10 jsou uvedeny nejdůležitější parametry pro optimalizování teplotního profilu. Téměř všechny parametry jsou v mezích hodnot doporučených výrobcem. Výjimka je opět gradient ohřevu, kde hodnoty jsou vyšší než $2,5 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$. V tomto případě je to dané rychlostí dopravníku a také pohlcením tepla jako v případě DPS č.SM10019. Maximální teplota byla naměřena $236,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, čas nad $217 \text{ }^{\circ}\text{C}$ byl cca 44,2 s. Oproti DPS č.SM10019 vykazuje DPS č. IO37102 menší integrál teplot. Příčina je v menším působení tepla na QFN pouzdro v zónách přetavení, z důvodů vyšší rychlosti dopravníku. Další parametr, nesplňující toleranci, je rozdíl teplot na QFN1 a QFN2. Rozdíl je větší jak $5 - 6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a to $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Pomocí softwaru MOLE MAP3 bylo zjištěno, že naměřený rozdíl je způsoben hlavně velkým rozdílem teplot v zóně chlazení. Možná příčina tkví v mezerách mezi malými DPS, které pak tvoří celek. Mezi mezery proudí proud vzduchu. Dané pouzdro QFN1 se více ochladí než je tomu u druhého QFN2, který je v té chvíli v zóně chlazení a stále se v něm akumuluje teplo.



Obrázek 32: Rozdíl teplot v zóně chlazení, IO37102

Tabulka 10: Naměřené hodnoty DPS č. IO37102 pomocí a MOLLE

Produkční profil	Gradient ohřevu	Čas mezi teplotami	Maximální teplota	Čas nad liquidem	Integrál teploty	Delta=rozdíl mezi teplotami TČ.	Delta = rozdíl vrcholových teplot	Gradient chlazení
	0-150	150-217 °C		217°C	217-300 °C			
	(°C/s)	(s)	(°C)	(s)	(°C*s)	(°C)	(°C)	(°C/s)
Povrch pouzdra	3,11	71	235,6	45	468	47	236	-3,7
BTC	2,56	72	233,9	44	439	49	234	-2,9
Dolní strana	2,28	70	235	42	420	37	235	-3,1
Povrch pouzdra QF2	3,06	72	236,7	46	476	46	237	-3,5
Dolní strana QFN2	2,06	72	235	45	404	37	235	-2,4
BTC QFN2	2,33	72	232,8	43	419	52	233	-2,7
Delta						15	4	
Rozdíl	1	2	4	4	72			1
Průměr	2,6	71,5	234,8	44,2	437,7			-3,1
Odchylka	0,43	0,84	1,35	1,47	28,93			0,51



Obrázek 33: Teplotní profil DPS č.SD4962DM3037, HELLER 182 EXL

Na obrázku 33 je zobrazen teplotní profil DPS č. SD4962DM3037. Daný průběh nevykazuje žádné větší výkyvy. Průběh ohřevu i chlazení je lineární. Rozkmit teplotního profilu je dán rychlostí dopravníku a rychlému přechodu mezi jednotlivými zóny. Další možná příčina může být vibrace při posuvu dopravníku či kroucení DPS a tím možným špatným dotykem termočlánku s měřeným místem.

Tabulka 11: Naměřené hodnoty DPS č. SD4962DM3037 pomocí a MOLLE

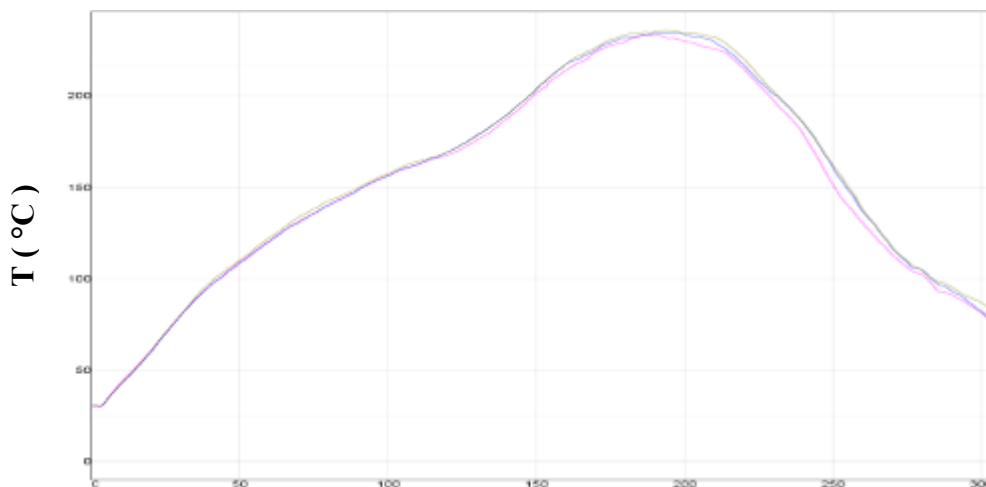
1. projekt	Gradient ohřevu	Čas mezi teplotami	Maximální teplota	Čas nad liquidem	Integrál teploty	Delta=rozdíl mezi teplotami Tč.	Delta = rozdíl vrcholových teplot	Gradient chlazení
	0-150	150-217 °C		217 °C	217-300 °C	20		
	(°C/s)	(s)	(°C)	(s)	(°C*s)	(°C)	(°C)	(°C/s)
BTC	2,11	79	237,8	54	655	26	238	-2,7
Dolní strana	1,83	78	236,1	54	604	26	236	-2,7
Povrch pouzdra	2,67	79	240,6	57	740	25	241	-3,5
Delta						1	5	
Rozdíl	1	1	5	3	136			1,0
Průměr	2,2	78,7	238,2	55	666,3			-3,0
Odchylka	0,43	0,58	2,27	1,73	68,7			0,4

Tabulka 12: Průměr všech změřených profilů DPS č. SD4962DM3037 pomocí a MOLLE

Průměr všech měření	Gradient ohřevu	Čas mezi teplotami	Maximální teplota	Čas nad liquidem	Integrál teploty	Delta=rozdíl mezi teplotami Tč.	Delta = rozdíl vrcholových teplot	Gradient chlazení
	0-150	150-217 °C		217 °C	217-300 °C	20		
	(°C/s)	(s)	(°C)	(s)	(°C*s)	(°C)	(°C)	(°C/s)
BTC	2,4	79,7	237,6	54,3	642,3	26,0	237,7	-2,7
Dolní strana	1,9	78,7	236,3	54,7	598,3	26,0	236,3	-2,8
Povrch pouzdra	2,7	79,3	240,8	56,3	730,3	25,0	241,0	-3,4
Delta						1,0	4,7	
Rozdíl	1,0	1,3	4,7	2,0	132,0			1,0
Průměr	2,3	79,2	238,2	55,1	657,0			-3,0
Odchylka	0,4	0,8	2,3	1,1	67,3			0,4

V tabulce č. 11 a č. 12 jsou uvedeny nejdůležitější parametry pro optimalizování teplotního profilu. Všechny parametry jsou v mezích hodnot doporučených výrobcem a normou IPC7093. Maximální teplota byla změřena 240,1 °C. Čas nad 217 °C se pohybuje vždy okolo 55 s. Vidíme opět výkyv v gradientu ohřevu. Možné příčiny jsou uvedeny v předešlých DPS. Hodnota přesahuje o 0,2 °C/s. Gradient chlazení je v doporučených mezích a nepřesahuje sestup < 4 °C/s. Rozdíl teplot mezi pouzdem QFN1 a QFN2 je menší jak 5 °C a splňuje daný požadavek na homogenitu tepla po celé DPS.

5.2.2 Teplotní profily produkčních DPS – IR pec DIMA SMRO-0180



Obrázek 34: Teplotní profil DPS č. SM10019 DIMA SMRO-0180 Čas (s)

Tabulka 13: Naměřené hodnoty DPS č. SM10019 pomocí SLIMKIC 2000

PWI= 102%	Max Rising Slope		Max Falling Slope		Preheat 25-150C		Peak Temp		Tot Time /217C	
<TC1>	1.88	50%	-2.48	1%	91.10	102%	233.67	-51%	55.86	6%
<TC2>	1.91	53%	-2.42	5%	91.10	102%	234.76	-37%	60.58	37%
<TC3>	1.94	55%	-2.36	9%	89.96	100%	236.28	-16%	62.57	50%
Delta	0.06		0.12		1.14		2.61		6.71	

Nastavení IR zářičů je popsáno v kap. 4. 1. Způsob měření je stejný jak v uvedené kapitole s vynecháním snímání termovizní kamerou.

Označení termočlánku:

- Tč.1: Nepájivá maska na levé straně
- Tč.2: Povrch QFN pouzdra
- Tč.3: Nepájivá maska na pravé straně

Na obrázku 34 je zobrazen teplotní profil DPS č. SM10019 měřený na IR peci DIMA SMRO-0180. Daný průběh nevykazuje žádné větší výkyvy. Průběh ohřevu i chlazení je lineární. Hodnoty a nastavení byly modifikovány podle dané konstrukce a možností IR pece.

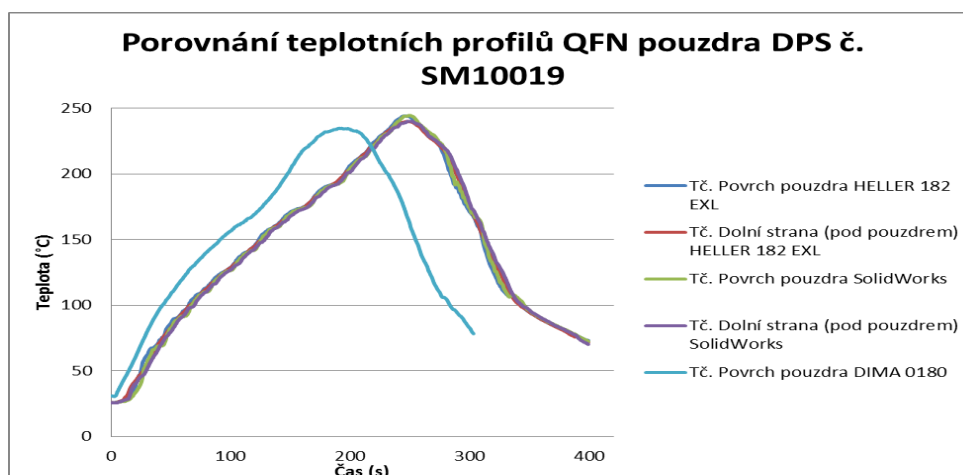
Než bylo dosaženo konečného PWI=102 %, bylo změřeno několik teplotních profilů, které dosahovaly vyšších nežádoucích hodnot PWI (150 % nebo 250 %). Příčiny byly způsobeny špatným kontaktem dolní strany DPS, kde nedocházelo ke kontaktu s plochou dopravníku a špatným vedením tepla od IR zářiče na dolní straně IR pece. Důvodem byl termočlánek zafixovaný na dolní straně DPS. Při špatném umístění DPS na dopravník tento termočlánek způsobil výše zmiňovaný nežádoucí efekt. Po odstranění dolního termočlánku se výsledky PWI zlepšily o několik desítek %.

V tabulce č. 13 jsou uvedeny nejdůležitější parametry pro optimalizování teplotního profilu. Většina parametrů jsou v mezích hodnot doporučených výrobcem a normou IPC7093. Výjimku tvoří předehřev. Příčiny jsou uvedeny v kap. 5.1.3. Největší teplota byla dosažena

236,3 °C a čas nad 217 °C se pohyboval okolo 60 s. Možné chyby a odchylky mohly být způsobeny skrze možné stínění kaptonovou páskou. Tyto chyby by mohly zmizet po aplikování lepšího materiálu pro fixaci termočlánků. Např. použitím teplovodivé pásky

Další profily a výsledky měření testovacích DPS(IO37102, SD4962DM3037) jsou k nalezení v příloze č. 1.

5.2.3 Porovnání s parametry uvedenými výrobcem pájecí pasty a IPC7093



Obrázek 35: Porovnání simulovaných a naměřených hodnot teplotního profilu

Na obrázku 35 je porovnání optimalizovaných teplotních profilů SM10019. Porovnány jsou výsledky změřené na konvekční peci HELLER 1812 EXL (Honeywell), IR pece DIMA SMRO-0180 (VUT) a výsledky simulované v programu SolidWorks. Viz [kap. 5.4](#). Zobrazené teplotní profily jsou pro termočlánky na povrchu pouzdra a dolní straně pouzdra. Výjimka je u IR pece DIMA SMRO-0180, kde termočlánek na dolní straně nebyl měřený a nebyl zahrnut do výsledků z důvodu možného zkreslení.

Z obrázku 35 vidíme shodný tvar teplotních profilů změřených na konvekční peci a v programu SolidWorks. Výsledné teplotní profily se výrazně neliší. Rozdíl mezi teploty je cca. 2 - 5 °C. Průběh ohřevu i chlazení má lineární tvar. Lineární nárůst teploty nám dává jasnější a lesklejší spoje. Vyskytuje se méně problémů s pájitelností, což vede k lepšímu smáčení. Minimalizuje se teplotní šok a redukuje energetické náklady.

Rozdíl vidíme u teplotního profilu naměřeného na IR peci. Teplotní profil vykazuje známky oblasti pro vyrovnání a nemá lineární gradient ohřevu. Je kratší z důvodů rozdílné konstrukce pece, kde konvekční pec obsahuje 12 teplotních zón a IR pec obsahuje 3 teplotní zóny. Na IR peci bylo dosaženo menších vrcholových teplot. Rozdíl oproti konvekční peci je cca. 7 °C.

Potvrdil se teoretický poznatek, že pro pájení pouzder QFN či BGA je výhodnější a lepší konvekční zařízení s více teplotními zóny a snadnější regulovatelností teploty. Minimalizují se také problémy způsobené rozdílnou barvou součástek a zástavbovou hustotou.

5.3 Tloušťka intermetalické sloučeniny a analýza defektů

5.3.1 Vyhodnocení pomocí optického a elektronového mikroskopu

Optický mikroskop

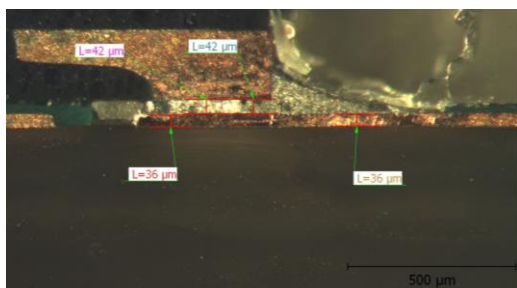
Vzorky prošly procesem, kde nejdříve na vybrané DPS byla pomocí šablonového tisku nanесena bezolovnatá pájecí pasta AIM NC257-2. U každé DPS byla provedena inspekce pájecí pasty (SPI). V další fázi byly DPS osazeny osazovacím automatem a poslány do reflow pece pro zapájení. Poté byly dopraveny na automatickou optickou inspekci (AIO).

Pro pozorování vzhledu QFN pouzder se vyhotovily mikrovýbrusy vybraných testovacích vzorků DPS č. IO307102, SM10019.

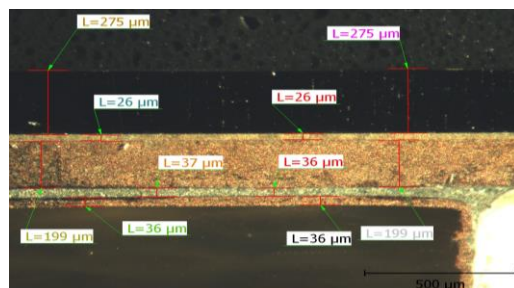
Pro vyhodnocení vzhledu BTC a bočního spoje byl použit optický mikroskop (Mikroskop s digitálním fotoaparátem OLYMPUS SZ61, software QuickPhoto Industrial 2.2 a AmScopeMU1000 =>VUT) a pro zjištění a změření tloušťky IMC (intermetalická vrstva) byl použit elektronový mikroskop VEGA 3 XMU (VUT). Vyhotovení mikrovýbrusů viz. kap.4.2. .



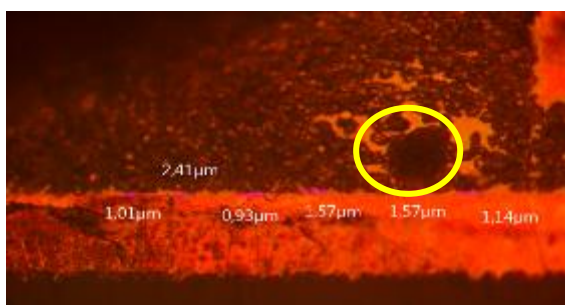
Obrázek 36: Mikrovýbrus DPS č. SM10019, celkový pohled



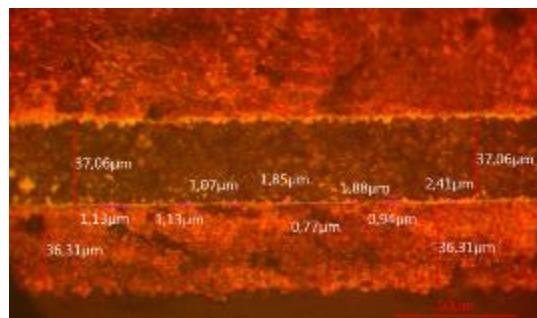
Obrázek 37: Mikrovýbrus DPS č. SM10019, boční vývod



Obrázek 38: Mikrovýbrus SM10019, měření QFN pouzdra



Obrázek 39: Mikrovýbrus, detail pod boční vývod, zvětšení 500X



Obrázek 40: Mikrovýbrus, detail pod BTC, zvětšení 500X

Na obrázku 36 vidíme řez QFN pouzdra DPS č. SM10019. Jsou zde zobrazeny 3 prokovy pro lepší odvod tepla, které mají vlastnost minimalizovat výskyt viodů.

Na obrázku 37 je zobrazena zapájená měděná pájecí ploška. Daný tvar pájeného spoje je lineární. Dle optického zkoumání, dané plošky, se zde vyskytla chyba a to nesmočení boční hrany terminálu. Podstata chyby je ve špatném smáčení. Možný důvod je v malé aktivitě tavidla v pájecí pastě, znečištění součástky či povrchu DPS. Tuto chybu však Honeywell ignoruje a soustředí se na zapájení BTC pro odvod tepla. Tloušťka pájky je 42 μm . Tlouška mědi je 36 μm .

Na obrázku 38 je zobrazen řez QFN pouzdrem a detailně změřené tloušťky chipu, lepidla, BTC a pájky. Tloušťka pájky je 36 μm . Tloušťka měděné plošky je 36 μm .

Daná měření byla provedena na mikroskop s digitálním fotoaparátem OLYMPUS SZ61.

Na obrázku 39 a 40 vidíme detail bočního vývodu a místa pod BTC při zvětšení 500x, provedeným mikroskopem AmScope MU1000. Po použití mikroleptu lze pozorovat i IMC vrstvy. Jednotlivé tloušťky jsou změřeny na těchto obrázcích. Průměrná tloušťka IMC vrstvy na DPS č. SM10019 je 1,415 μm . Tloušťky se shodují s naměřenými tloušťkami na elektronovém mikroskopu. Viz. [kap.5.3.2](#). Na obrázku 39 vidíme dutinu či prasklinu v pájeném spoji. Voids, zpravidla procesní voidy, jsou způsobeny v důsledku vyššího povrchového napětí pájky, vyšší teplotou tavení, nesprávnou rychlostí ohřevu, chlazení či povrchovou úpravou DPS.



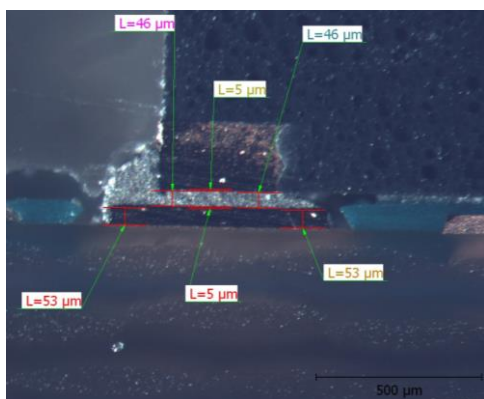
Obrázek 41: Mikrovýbrus DPS č. IO37102, celkový pohled

Na obrázku 41 vidíme řez QFN pouzdra s DPS č. IO307102. Je zde znázorněna teplotně vodivá ploška, tepelně vodivá pasta a křemíkový čip. Dle optického zkoumání na daných ploškách se zde vyskytuje dutina pod BTC ploškou.

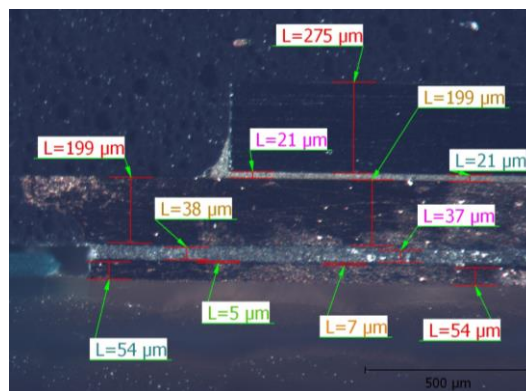
Daná chyba je zobrazena na obrázku 46. Vznik dutin v pájeném spoji BTC může souviset s rozpouštědly v pájecí pastě. Rozpouštědla s nízkými body varu nebo nesprávným nastavením parametrů při pájení, mohou zvýšit výskyt dutin v pájeném spoji BTC. Další příčina může být „uvězněná“ vlhkost mezi součástkou a DPS.

Na obrázku 42 je zobrazena boční měděná pájecí ploška. Tloušťka pájecí pasty je 46 μm a tloušťka meděné plošky je 53 μm .

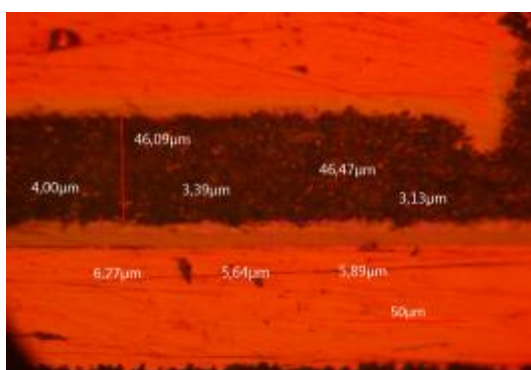
Na obrázku 43 je zobrazen řez QFN pouzdrem a detailně změřené tloušťky chipu, lepidla, BTC a pájky. Tloušťka pájky se pohybuje okolo 37 - 38 μm . Tloušťka měděné plošky je 54 μm .



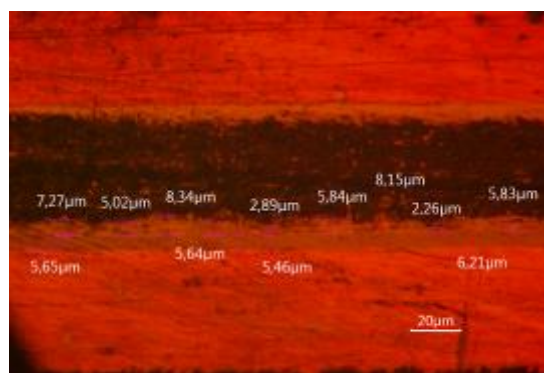
Obrázek 42: Mikrovýbrus DPS č. IO37102, boční vývod



Obrázek 43: Mikrovýbrus IO3710, měření QFN pouzdra



Obrázek 44: Mikrovýbrus, detail pod boční vývod, zvětšení 500X



Obrázek 45: Mikrovýbrus, detail pod BTC, zvětšení 500X



Obrázek 46: Detail na void , DPS č. IO37102

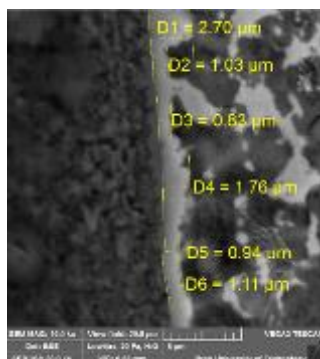
Na obrázku 44 a 45 vidíme detail bočního vývodu a místa pod BTC při zvětšení 500x. Je zde také zobrazena vrstva niklu o tloušťce 5 - 6 μm . Tato vrstva potvrzuje, že na DPS č. IO37102 je povrchová úprava ENIG (technologie kombinující nanášení chemického niklu a poté vrstvy zlata). Průměrná tloušťka IMC vrstvy na DPS č. IO37102 je 5,14 μm . Průměrná tloušťka na elektronovém mikroskopu je však o 1,5 μm vyšší. Tato chyba může být způsobena počtem měření, rozlišením a také měřením jiného místa s jinou tloušťkou IMC, která je na různých místech jiná.

Elektronový mikroskop

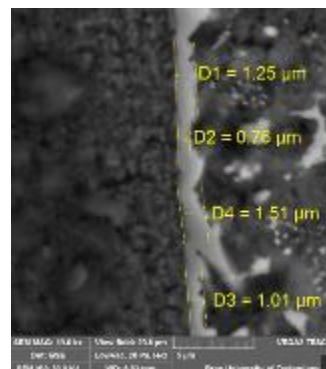
Pro zkoumání struktury vzorku a tloušťky IMC vrstvy je potřeba elektronový mikroskop. Dosáhneme tak většího rozlišení a můžeme provést prvkovou analýzu.

Nejdříve byla pomocí SEM (rastrovací elektronový mikroskop) zkoumána struktura vrstev pájených spojů na bočních vývodech a pod BTC ploškou. Rozhraní měď - pájka. Poté byla měřena tloušťka IMC vrstvy. Přehledné obrázky vzorku z DPS č. SM10019 a IO37102 jsou níže.

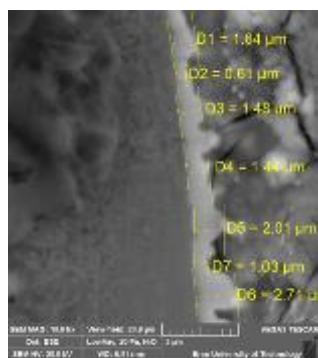
DPS č. SM10019



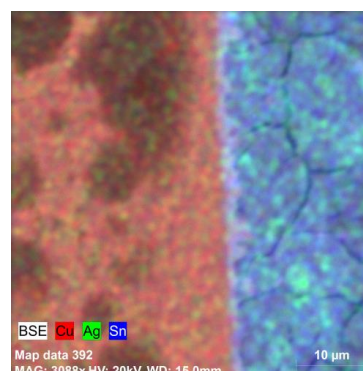
Obrázek 47: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní měď-pájka, pod BTC ploškou



Obrázek 48: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní měď-pájka, pod BTC ploškou



Obrázek 49: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní měď-pájka, boční vývod



Obrázek 50: Chemické rozložení prvků ve vybrané oblasti (mapování)

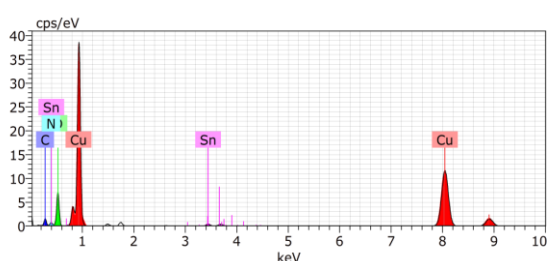
Na obrázku 47 - 48 můžeme vidět zformovanou a vytvořenou IMC vrstvu. Vzhledem k nerovnoměrné struktuře povrchu IMC vrstvy bylo provedeno měření tloušťky vždy na několika místech, po celé délce vybraného místa. Z těchto naměřených tloušťek byla vypočtena průměrná tloušťka IMC vrstvy. Pro získání přesnějších hodnot tloušťky IMC vrstvy by vyžadovalo lepší počítačové zpracování získaných obrazů. Výsledky pro DPS č. SM10019 jsou v tabulce č. 14.

Na obrázku 50 vidíme rozložení prvků v zobrazené oblasti. Můžeme zde pozorovat rozprostření stříbra v oblasti pájky SAC a také oblast difúze, ze které se vytvoří IMC vrstva. Viditelné částičky stříbra se do oblasti mědi mohli dostat při úpravě vzorku (broušení a leštění).

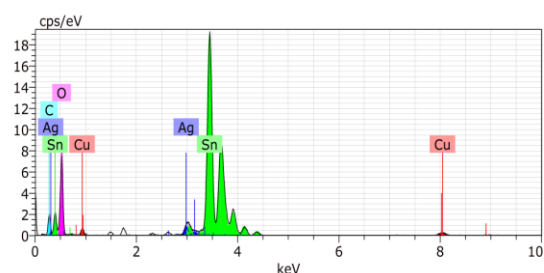
Tabulka 14: Jednotlivá měření tloušťky IMC vrstvy, průměrná hodnota

1. vzorek	Pod čipem									
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tloušťka (μm)	2,7	1,03	0,83	1,76	0,94	1,11	1,25	0,76	1,51	1,01
1. vzorek	Boční vývod							Průměr: 1,25 μm		
Měření	1	2	3	4	5	6	7			
Tloušťka (μm)	1,64	0,61	1,48	1,44	2,01	1,03	2,71			

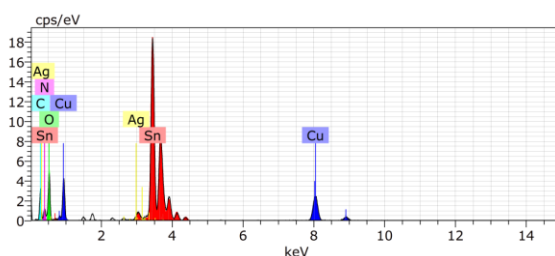
Pomocí EDS analýzy byl zjištěn obsah prvků na rozhraní měď, pájka, IMC vrstva. Výsledky jsou zobrazeny v grafech č. 51 - 53 a přehledně v tabulce č. 15. Jsou zde i hodnoty normativního hmotnostního složení.



Obrázek 51: Spektrum rentgenového záření na rozhraní měď



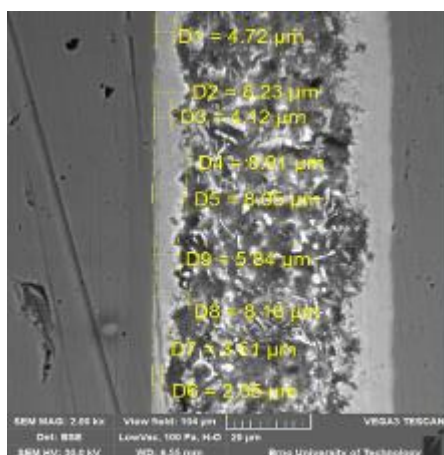
Obrázek 52: Spektrum rentgenového záření na rozhraní pájka SAC305



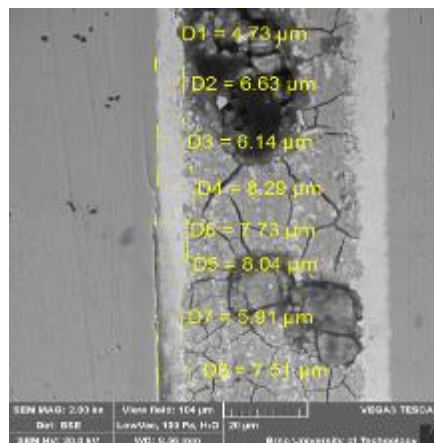
Obrázek 53: Spektrum rentgenového záření na rozhraní IMC

Tabulka 15: Výsledky EDS analýzy zkoumaných oblastí, SM10019

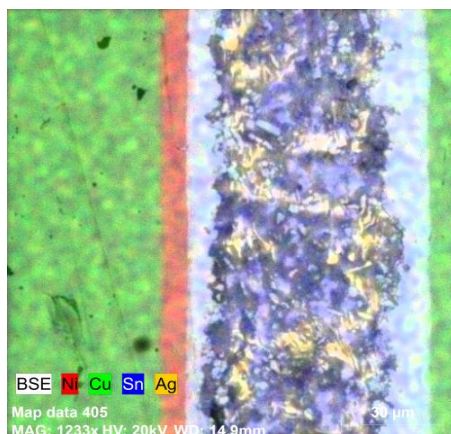
Rozhraní měď	prvek	Měď (Cu)	Kyslík (O)	Uhlík (C)	Dusík (N)	Cín (Sn)	
Norm. hmotnostní složení	(%)	71,96	14,79	8,11	3,8	1,34	
Rozhraní pájka	prvek	Cín (Sn)	Kyslík (O)	Uhlík (C)	Stříbro (Ag)	Měď (Cu)	
Norm. hmotnostní složení	(%)	55,73	33,76	7,01	1,9	1,59	Stříbro (Ag)
Rozhraní IMC vrstva	prvek	Cín (Sn)	Kyslík (O)	Měď (Cu)	Uhlík (C)	Stříbro (Ag)	
Norm. hmotnostní složení	(%)	49,72	19,12	11,96	11,83	6,78	0,59



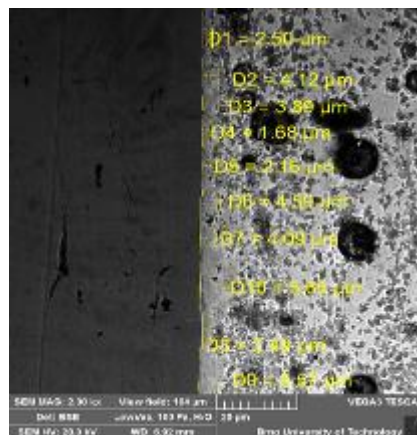
Obrázek 54: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní nikl-pájka, pod BTC ploškou, několikanásobné přetavení



Obrázek 55: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní nikl-pájka, boční vývod, několikanásobné přetavení



Obrázek 56: Chemické rozložení prvků ve vybrané oblasti (mapování)



Obrázek 57: Struktura a tloušťka IMC na rozhraní nikl-pájka, pod BTC ploškou, 1x přetavení

Vzhledem k nerovnoměrné struktuře povrchu IMC vrstvy bylo opět provedeno měření tloušťky vždy na několika místech po celé délce vybraného místa. Z těchto naměřených tloušťek byla vypočtena průměrná tloušťka IMC vrstvy.

Na obrázku 54, 55 vidíme zformovanou a vytvořenou IMC vrstvu. Daná DPS byla při testech zapájena na konvekční peci a několikrát na IR peci. Na DPS působilo několik teplotních cyklů o nejvyšší teplotě 250 °C. Na obrázku 57 vidíme zformovanou a vytvořenou IMC vrstvu, která prošla jednou procesem přetavením na konvekční peci HELLER.

Výsledky pro DPS č. IO37102 jsou v tabulce č. 16 a č. 17. Při porovnání výsledků bylo zjištěno, že tloušťka jednotlivých vzorků se liší o 2,64 μm. Rozdíl je způsoben delším časem působení tepla nad 220 °C, který se několikrát opakoval při optimalizování teplotních profilů a to po dobu jednoho týdne.

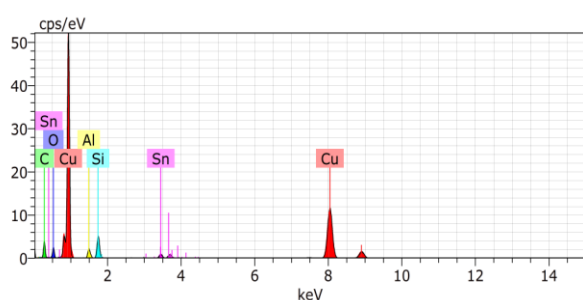
Na obrázku 56 vidíme rozložení prvků v zobrazované oblasti. Můžeme zde pozorovat rozprostření stříbra v oblasti pájky SAC a oblast difúze, ze které se vytvoří IMC vrstva. Lze pozorovat také vrstvu Niklu o tloušťce 5 - 6 μm . Vrstva má rovnoměrný povrch a strukturu. Vrstva potvrzuje existenci povrchové úpravy ENIG na DPS č. IO37102.

Tabulka 16: Měření tloušťky IMC vrstvy, průměrná hodnota, DPS 1x přetavena

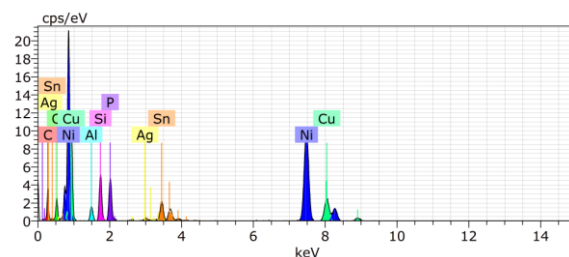
Po 1x přetavení										
2.vzorek	Boční vývod									
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tloušťka (μm)	2,5	4,12	3,89	1,68	2,16	4,59	4,09	5,65	2,49	5,57
										průměr: 3,99 μm

Tabulka 17: Měření tloušťky IMC vrstvy, průměrná hodnota, DPS několikanásobně přetavena

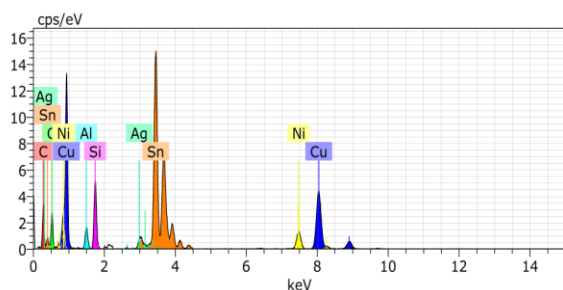
Po několikanásobném přetavení										
2. vzorek	Pod čipem									
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tloušťka (μm)	4,73	6,63	6,14	8,29	7,73	8,04	5,91	7,51	-	-
2. vzorek	Boční vývod									
Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Tloušťka (μm)	4,72	8,23	4,12	8,91	8,05	5,84	8,16	3,51	2,35	průměr: 6,63 μm



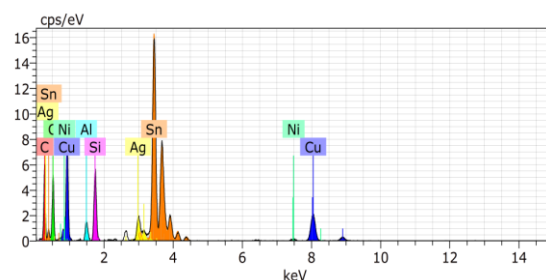
Obrázek 58: Spektrum rentgenového záření na rozhraní měď



Obrázek 59: Spektrum rentgenového záření na rozhraní měď- nikl



Obrázek 60: Spektrum rentgenového záření na rozhraní IMC



Obrázek 61: Spektrum rentgenového záření na rozhraní pájka SAC305

Tabulka 18: Výsledky EDS analýzy zkoumaných oblastí, IO37102

Rozhraní měď	prvek	Měď	Uhlík	Kyslík	Křemík	Cín	Hliník		
Norm. hmotnostní složení	(%)	64,96	19,72	5,78	4,23	2,95	2,37		
Rozhraní měď-nikl	prvek	Nikl	Uhlík	Měď	Cín	Kyslík	Fosfor	Křemík	Hliník
Norm. hmotnostní složení	(%)	44,04	18,85	14,29	6,6	6,37	4,04	3,72	1,65
Rozhraní IMC vrstva	prvek	Cín	Měď	Uhlík	Kyslík	Nikl	Křemík	Hliník	Stříbro
Norm. hmotnostní složení	(%)	39,74	23,4	16,42	8,61	5,21	3,68	1,69	1,25
Rozhraní pájka	prvek	Cín	Uhlík	Kyslík	Měď	Křemík	Stříbro	Hliník	Nikl
Norm. hmotnostní složení	(%)	40,21	22,48	18,13	10,65	3,46	3,17	1,37	0,54

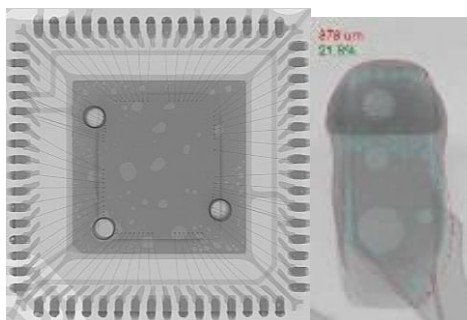
Pomocí EDS analýzy byl zjištěn obsah prvků na rozhraní měď, nikl, pájka, IMC vrstva. Výsledky jsou zobrazeny v grafech č. 58 - 61 a přehledně v tabulce č. 18. Jsou zde i hodnoty normativního hmotnostního složení.

Obsah hliníku je pravděpodobně z části ovlivněn zbytky ze smirkových papírů při hrubé mechanické přípravě vzorků. Obsah křemíku je ovlivněn zbytky z křemíkového čipu při hrubé mechanické přípravě vzorků. Obsah dusíku je pravděpodobně dán působení mikropetu po dobu 5 - 10 s pro zvýraznění zkoumaných vrstev.

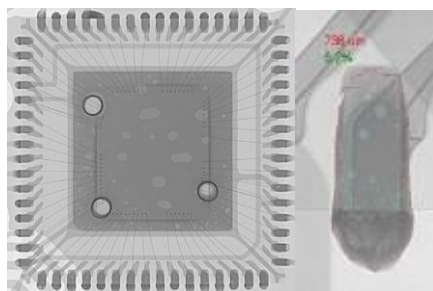
5.3.2 Rentgenová kontrola

Hlavním důvodem, proč se dělá rentgenová kontrola, je dostupnost pro kontrolu chladících plošek na QFN pouzdru či BGA pouzdru. Tato kontrola nám může napovědět o kvalitě procesu pájení a definitivně určit zdroje chyby.

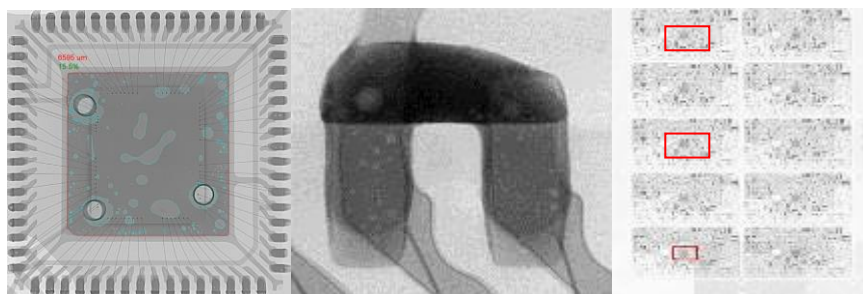
Rentgenové snímky pro diplomovou práci byly pořízeny ve firmě SANMINA. Diagnostikovány byly produkční DPS č. IO37102 s třemi otvory pro lepší odvod tepla a č. SM10019 s devíti otvory pro lepší odvod tepla. Pro kontrolu byly vybrány jen místa s QFN pouzdry. Rentgenový snímek ukázal místa pod pouzdrům, na tepelně vodivé plošce či bočních vývodech, kde nebylo jasné, zdali jsou voidy či zkratky.



Obrázek 62: Pohled na QFN pouzdro a plošku (DPS horní) DPS č. IO37102



Obrázek 63: Pohled na QFN pouzdro a plošku (DPS dolní) DPS č. IO37102

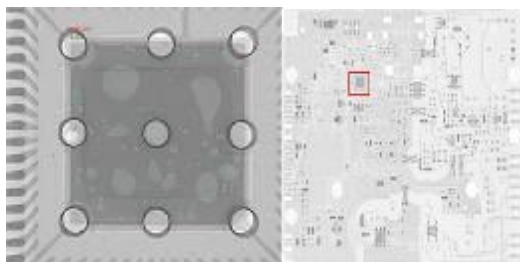


Obrázek 64: Pohled na QFN pouzdro a plošku (DPS střední) DPS č. IO37102

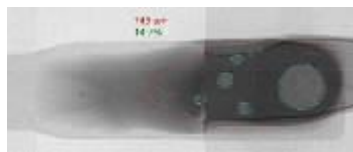
Na obrázku 62 je snímek QFN pouzdra DPS č. IO37102. Je zde vidět, že QFN pouzdro je správně kontaktováno, ale na plošce pro lepší odvod tepla můžeme sledovat voidy. Voidy jsou místa se světlou barvou (bílé skvrny). Jsou zde zobrazeny i boční vývody s největším a nejmenším zjištěným množstvím voidu v procentech. Konkrétně u bočního vývodu bylo zjištěno největší množství voidu 21,8 % (plocha = 878 μm) a nejmenší množství voidu 6,2 % (plocha = 736 μm). Množství voidu na plošce pro lepší odvod tepla je 15,5 % (plocha = 6895 μm). Na obrázku 64 vidíme vzniklý zkrat na boční plošce QFN pouzdra. Zkrat patří mezi nejčastěji vyskytované chyby u pájení přetavením QFN pouzder. To potvrzuje i statistické vyhodnocení uvedené v kapitole 5.5.2.

Na obrázku 65 vidíme rentgenový snímek QFN pouzdra DPS č. SM10019. Množství voidu na plošce pro lepší odvod tepla je 18,6 % (plocha = 6605 μm). U bočního vývodu bylo

zjištěno největší množství voidu 14,7 % (plocha = 743 μm). Další defekty, způsobené procesem pájení přetavením, se na této DPS se nevyskytovaly.



Obrázek 65: Pohled na QFN pouzdro DPS č. SM10019



Obrázek 66: Pohled na plošku QFN pouzdra DPS č. SM10019

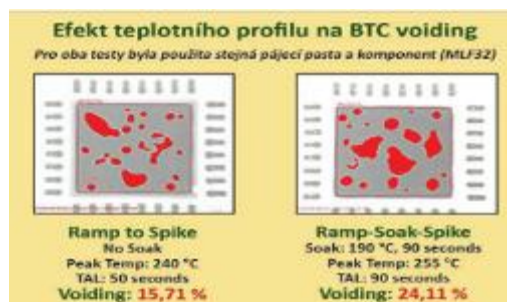
Dle normy IPC-A-610E může být povolen maximální přesah vývodů do stran v třídě 1 až 50 % šířky a 25 % ve třídě 2 a 3. Kritéria pro přijetí množství voidů jsou většinou stavena mezi zákazníkem a výrobcem. V praxi se uvádí povolení množství voidů v pouzdře QFN menší jak 25 %. V současné době nepanuje jasná shoda nad tím, jak velké množství voidů je akceptovatelné, trend do budoucna je jasný, čím méně voidů, čím menší voidy, tím lépe.

Dle rentgenových snímků uvedených v této práci, se toto kritérium splňuje.

Dle normy IPC7093 tepelně vodivá ploška může mít značný výskyt dutin, hlavně díky relativně velké ploše spoje. Dobrým návrhem šablony se snažíme dosáhnout 50 až 60 % pokrytí kontaktní plošky. Tabulka č. 19 ukazuje procentuální možný výskyt dutin pro označené návrhy šablon a podmínek prokovů.

Tabulka 19: Pravděpodobnost výskytu dutin na BTC za použití různých šablon [8]

Návrh aplikací	Plocha bez otvorů	Plocha s otevřenými otvory	Plocha s uzavřenými otvory
Návrh šablony (plná plocha)	50 % výskyt dutin	70 % výskyt dutin	35 % výskyt dutin
Návrh šablony (segmentovaný)	35 % výskyt dutin	45 % výskyt dutin	25 % výskyt dutin
Dispence	15 % výskyt dutin	35 % výskyt dutin	15 % výskyt dutin

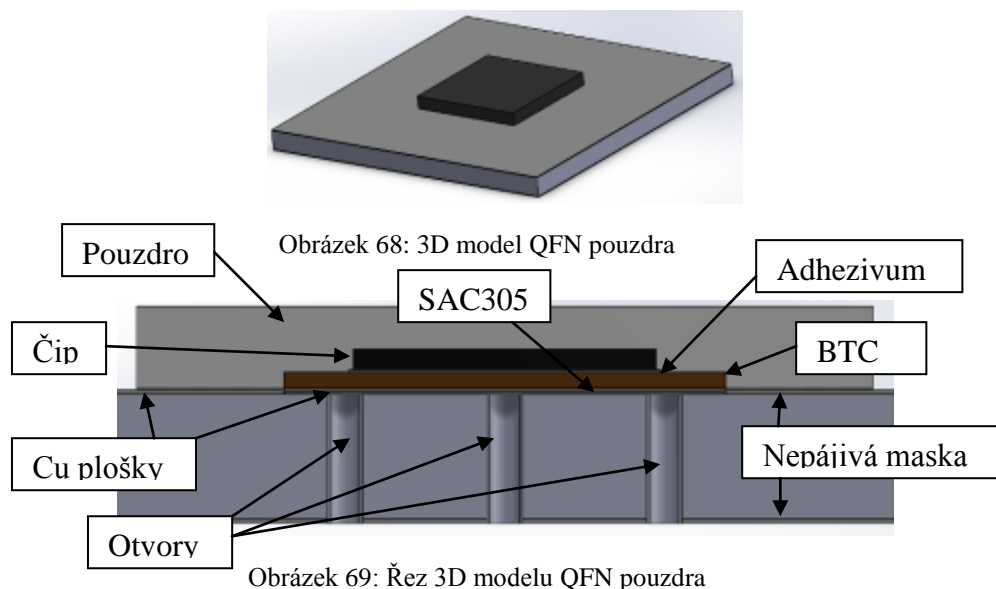


Obrázek 67: Efekt teplotního profilu na BTC voiding [17]

Dle článku [17] tvorbě voidů lze zabránit také rozdělením velkých plošek nepájivou maskou. Zabraňuje spojení několika menších voidů do jednoho velkého. Zároveň umožní volný průchod vypařujícím se zbytkům tavidla. Toto neplatí pro plošky, které mají tepelné otvory pro lepší odvod tepla, protože už tvoří cestu pro odpaření tavidla. Ověřilo se, že množství a velikosti voidů nejsou tak závislé na procentu pokrytí plošky ale spíše na designu - tvaru otvoru. Při volbě vhodného profilu pájecí pasty firmy AIM nejlepší výsledky byly dosahovány na profilech s nižší vrcholovou teplotou a kratším časem nad liquidem. Při vyšších teplotách a dlouhých časech se množství voidů zvýšilo.

5.4 Simulace přestupu tepla QFN pouzdra

V programu SolidWorks byl vytvořen 3D model DPS s QFN pouzdra. Rozměry, umístění a složené části QFN pouzdra odpovídají realitě a dle norem. Byla zvolena externí analýza. Pro každé objemové těleso se nastavil vhodný materiál, okrajové podmínky a oblast výpočtu.



Nastavení průvodce projektu simulací Project wizard

Tabulka 20: Nastavení průvodce simulací

Unit system	SI
	Temperature z K na °C
Analysys type	External
	Exclude internal space
Physical features	Heat conduction in solids
	Heat conduction in solids only
	Time – dependent
Default solid	FR4
Initial and ambient condition	Ponechat beze změny
	Initial solid temperature 25 °C
Results and geometry resolution	5

Vstupní podmínky

Základní vstupní podmínky byly zadány na povrch pouzdra, nepájivou masku a dolní stranu FR4 (pod pouzdra). V nabídce Boundary Conditions se vybere podmínka Real Wall a aktivujeme položku Dependency typu: F(time)-table. Na vybraných stěnách (povrch pouzdra, nepájivá maska a dolní strana FR4) je poté nastavena časová závislost na teplotě. Do této závislosti byly nahrány naměřené hodnoty teplotního profilu DPS č.SM10019 z měření ve firmě HONEYWELL.

Oblast výpočtů

Program automaticky nastaví základní oblast výpočtu. Čím větší tato oblast je, tím delší bude doba výpočtu. Pokud se jedná o symetrické těleso, je možné počítat pouze část modelu. V našem případě byla oblast výpočtu zmenšena na nutné minimum pro dostatečnou simulaci.

Přiřazení materiálu

Přiřazení materiálů pro DPS s QFN pouzdrem je v následující tabulce:

Tabulka 21: Materiály použité v simulaci

Materiál	Přiřazený materiál	Hustota	Tepelná vodivost	Měrná tepelná kapacita
		(kg/m ³)	(W/m*K)	(J/(kg*K))
FR4	FR4	1200	0,3	880
Nepájivá maska	Epoxy resin	1120	0,2	1400
Plošky	Měď	8960	401	385
BTC_tepelně vodivá ploška				
Chip	Křemík	2330	150	712
Pájecí pasta AIM NC257-2	SAC305	7370	58	232
Pouzdro	QFN pouzdro	2088	0,67	900
Adhezivum	Adhezivum	2400	3,8	800

Materiály jsou vybrány buď z knihovny Flow Simulation a nebo byly vytvořeny (knihovna uživatele) podle získaných parametrů materiálu z dostupných zdrojů. Např.[13] [15]

Definování cílů výpočtu

V následující tabulce 22 je přehled vyhodnocovaných veličin, Goals, kde chceme sledovat minimální, maximální a průměrnou teplotu na modelu a tepelný tok. V této práci reprezentují goals termočlánky.

Tabulka 22: Přehled cílů výpočtu

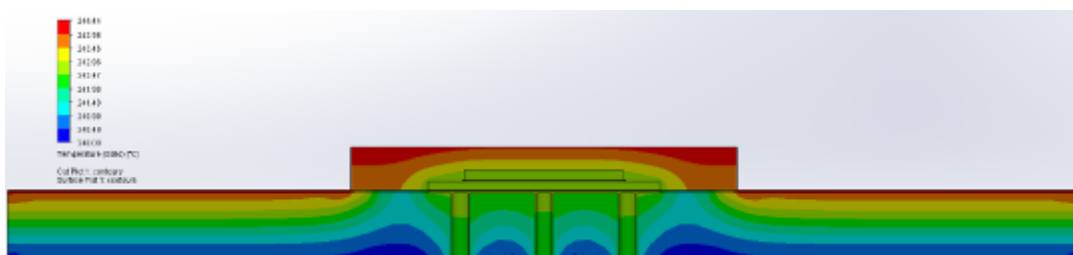
Global goal	Av Heat flux
Surface goals	Av Temperature (solid) 1_Povrch pouzdra
	Av Temperature (solid) 2_Napájivá maska
	Av Temperature (solid) 3_Dolní strana
	Av Temperature (solid) 4_Ploška pod QFN pouzdrem
	Av Temperature (solid) 5_BTC_tepelně vodivá ploška
Point goals	Temperature (Solid)1_Boční vývod
	Temperature (Solid)2_Boční vývod

Dané výsledky odpovídají přestupu tepla na DPS č.SM10019, která byla určena pro simulaci. Simulace byla počítána s krokem 0,1 s, kdy po 0,5s se daná hodnota teploty uloží. Proto jsou výsledky rozděleny do určitých časů, které reprezentují dané části teplotního profilu (přehřev, přetavení, chlazení). Tyto časy jsou 120 s, 249 s, 345 s.

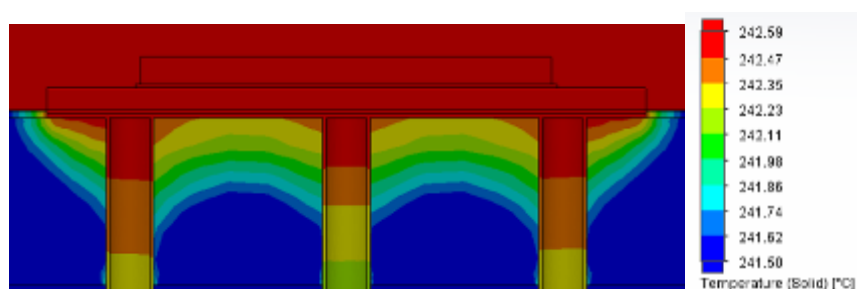
V tabulce 23 jsou uvedeny výsledky naměřených teplot vypočtených pomocí Flow Simulation pro určenou zónu přetavení v čase 249 s. Zbytek výsledků pro jednotlivé zóny (předehřev, chlazení) jsou k nalezení v příloze č. 4. Následující stránky obsahují i grafické znázornění rozložení teplot v DPS s QFN pouzdrům.

Tabulka 23: Výsledky simulace, čas 249 s

Měřené cíle	Jednotka	Hodnota	Průměrná hodnota	Minimální hodnota	Maximální hodnota
GG Av Heat Flux 1	(W/m ²)	-42,03	-81,97	-128,43	-42,03
PG Temperature Boční vývod	(°C)	243,45	243,26	243,11	243,45
PG Temperature Boční vývod	(°C)	243,42	243,23	243,07	243,42
SG Av Temperature Povrch pouzdra	(°C)	244,44	244,07	243,89	244,44
SG Av Temperature Nepájivá maska	(°C)	244,44	244,45	244,44	244,56
SG Av Temperature Dolní strana	(°C)	240,00	239,89	239,44	240,00
SG Av Temperature Ploška pod QFN pouzdrům	(°C)	242,60	242,31	242,05	242,60
SG Av Temperature BTC_tepelně vodivá ploška	(°C)	242,60	242,31	242,06	242,60

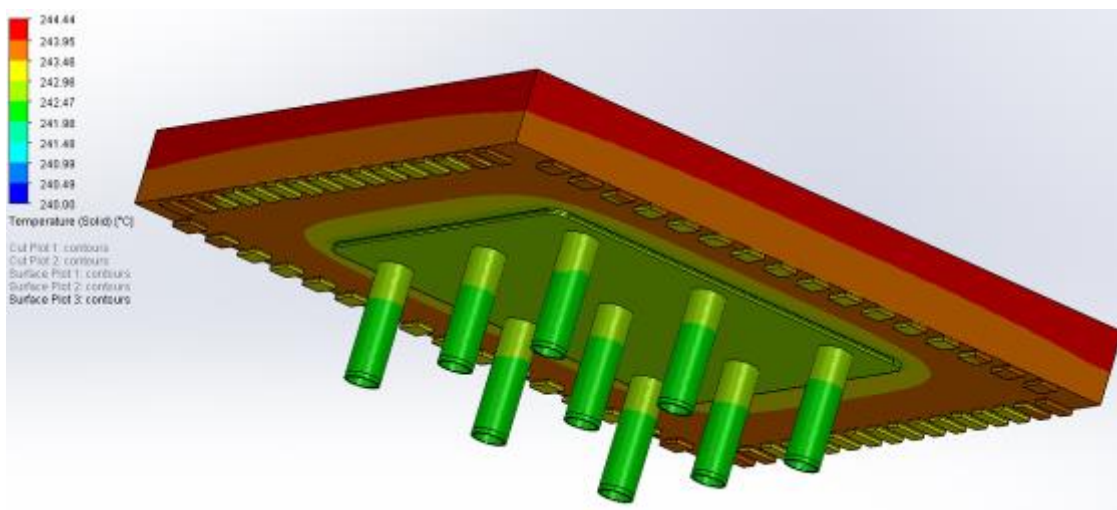


Obrázek 70: Rozložení teplot v QFN pouzdru, čas: 249 s



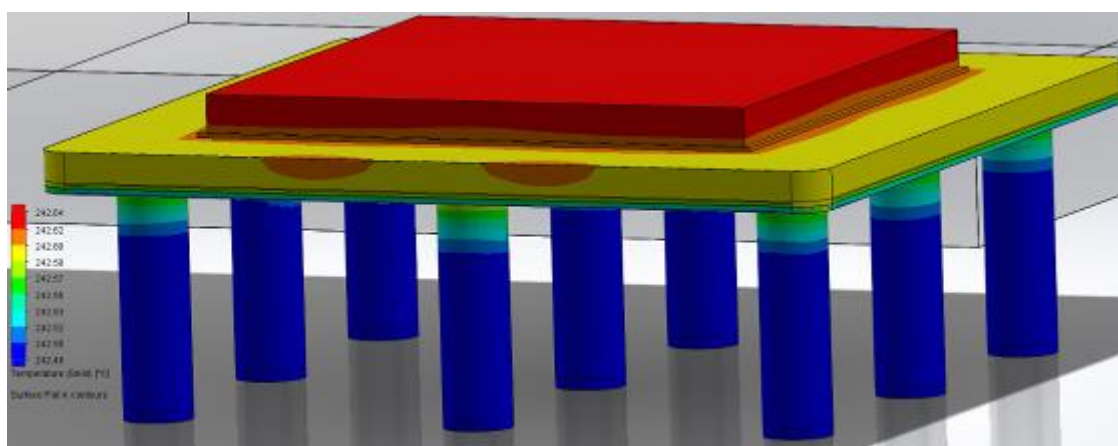
Obrázek 71: Detail přestupu tepla mezi chipem, BTC, otvory (jiné rozpětí teplot)

Na obrázku 71 je detailní zobrazení přestup tepla mezi chipem, BTC a otvory pro lepší odvod tepla. Je zde vidět, že otvory a BTC skutečně plní svoji funkci pro lepšího chlazení a odvodu tepla z chipu. Na rozdíl od obrázku 70 je zde jiné rozmezí teplot. Viz legenda u obrázku 71.

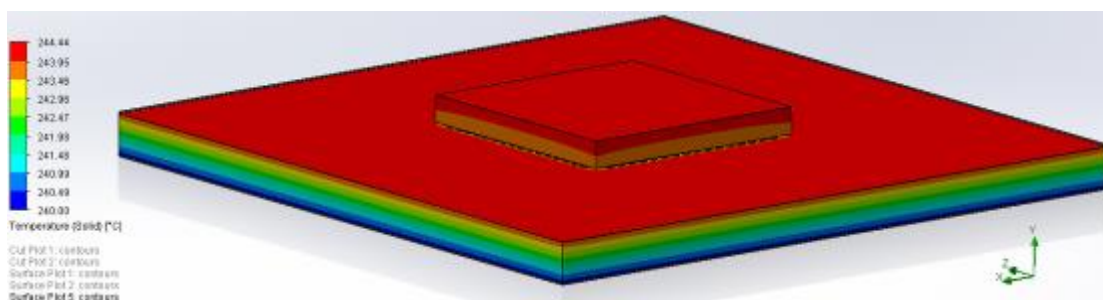


Obrázek 72: Rozložení teplot na BTC, otvorech a bočních padech, čas: 249 s

Na obrázku 70 - 74 je zobrazeno rozložení teplot pomocí Cut plots a surface plots. Na modelu je patrné, že nejvyšší teplota je dosažena na povrchu pouzdra. Je zde patrný přestup tepla skrze pouzdro, BTC plošku, pájecí slitinu SAC305 až na dolní stranu DPS. Také je zobrazeno odvádění tepla přes otvory zakomponované v FR4.

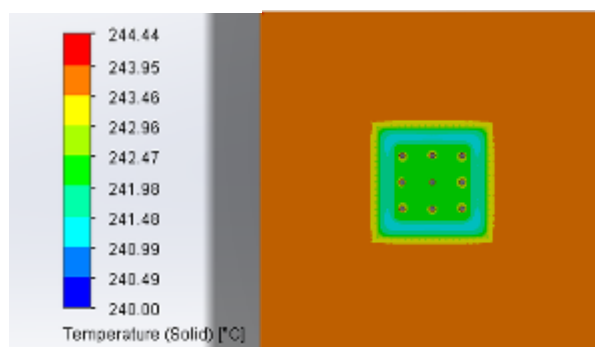


Obrázek 73: Rozložení teplot uvnitř pouzdra a otvorech, čas: 249 s

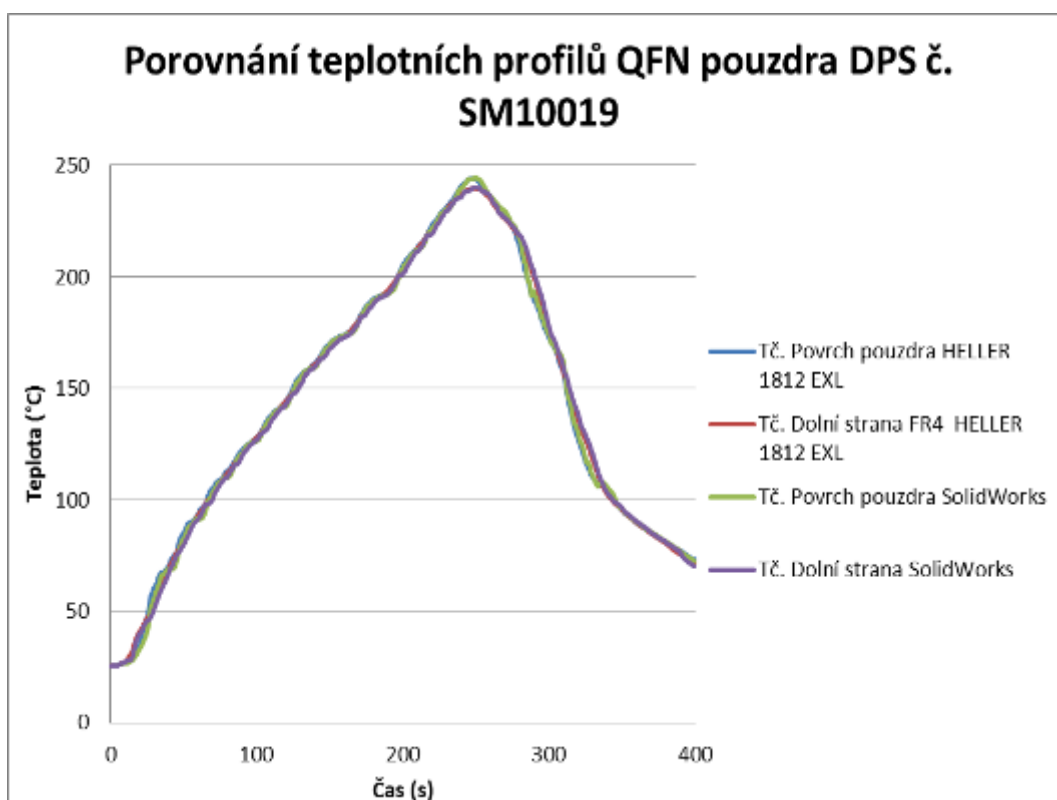


Obrázek 74: Rozložení teplot celého modelu, čas: 249 s

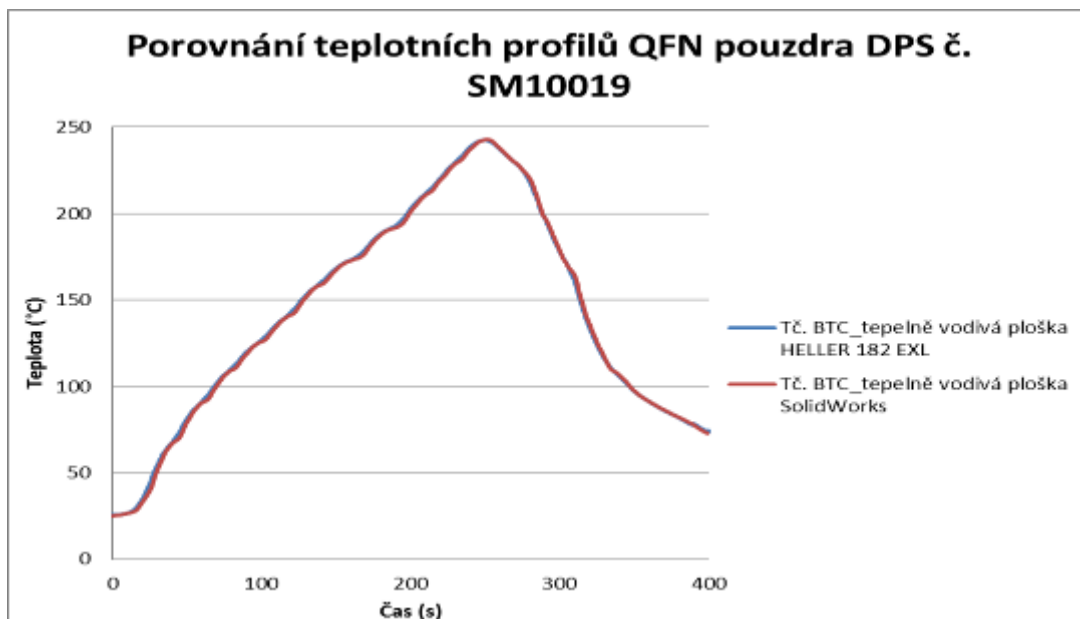
Na obrázku 74 si můžeme všimnout odlišných teplot, při simulaci pájení přetavení v horkovzdušné peci HELLER, na povrchu pouzdra, nepájivé masky a dolní strany FR4. Teoreticky, v každé zóně horkovzdušné pece, by měly topné moduly (trysky) působit stejně a mít teploty homogení, jak na horní tak i na dolní straně DPS. Tato nehomogenita teplot je způsobena rozdílnou vzdáleností topných modulů od DPS, která je umístěna na dopravníku. Vzdálenost horní strany DPS a horního topného modulu je 4 cm. Vzdálenost dolní strany DPS od dolního topného modulu je 6 cm. Proto můžeme vidět na dolní straně DPS menší teploty.



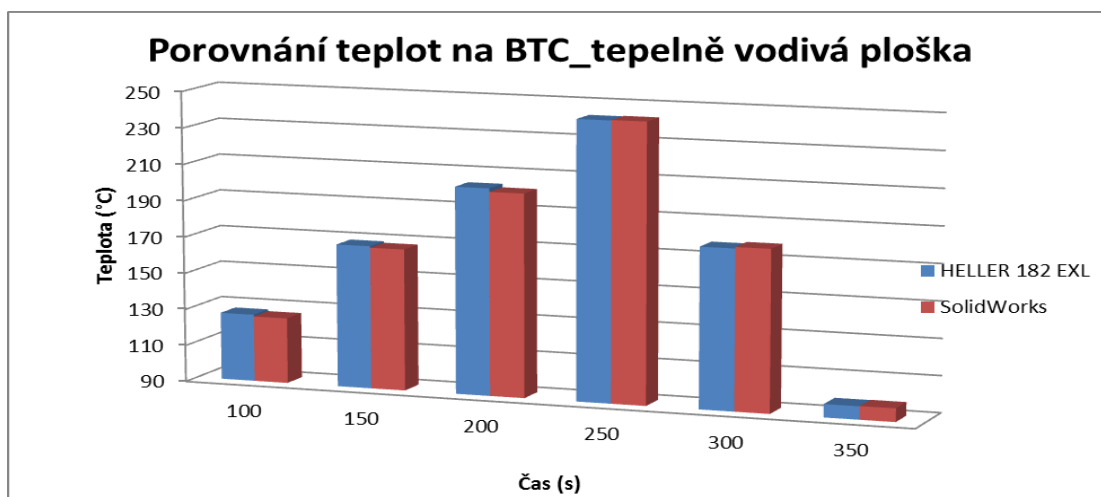
Obrázek 75: Rozložení teplot, pohled horní rovina, vzdálenost 0,45 mm od středu, čas: 249 s



Obrázek 76: Porovnání měřeného a simulovaného teplotního profilu DPS č. SM10019



Obrázek 77: Porovnání měřeného a simulovaného teplotního profil DPS č. SM10019 pro BTC



Obrázek 78: Srovnání výsledku měření a simulace pro teploty na povrchu pouzdra

Na obrázku 76 je zobrazeno srovnání měřených a simulovaných teplotních profilů. Z porovnání je patrné, že nebyly zaznamenány příliš velké odchylky a simulovaný teplotní profil kopíruje naměřený profil.

Měřený teplotní profil byl zaznamenán pomocí profiloměru MOLE MAP3 (HONEYWELL). Simulovaný teplotní profil byl vytvořen pomocí funkce xy plot v programu SolidWorks, Flow Simulation.

5.5 Technologický postup pájení QFN pouzder na produkčních DPS

5.5.1 Technologický tok

Montáž QFN pouzdra probíhá v technologických linkách. Zařízení jsou uspořádány logicky dle typického technologického toku, který vyžaduje odpovídající charakter výroby i typ montáže. Cílem je minimalizace výrobních nákladů, maximální kvalita produkce i maximální efektivita procesu.



Obrázek 79: Montáž QFN pouzdra

Obrázek 79 představuje technologický postup pájení QFN pouzder. Nejprve se DPS umístí na dopravník a pokračuje směrem k tisku pájecí pasty přes šablonový tisk. Následně se provede kontrola přes SPI a DPS se osadí QFN pouzdry v osazovacím automatu, který pracuje na principu sekvenčního osazování (pick and place). Po osazení nastává pájení QFN pouzdra a poté automatická optická kontrola. Na závěr se provede elektrické testování a funkčnost obvodu. Výše uvedené procesy jsou více popsány na následujících stránkách.

Vstupní materiál

Vstupní materiál je dovážen od jiných firem podle dané objednávky a požadavků. Zpracují se v dodaném stavu. Její příprava není nutná. Předpokládá se, že DPS přichází ke zpracování testována. Většinou jde o dvouvrstvou či vícevrstvou DPS typu FR4. Tloušťky 1,5 mm. Povrchová úprava se obvykle používá HAL (žárové nanesení pájkou definované tloušťky na měděný podklad) či ENIG (nanesením chemického niklu a malé vrstvy zlata).

V tomto kroku mohou být chyby způsobeny špatnou povrchovou úpravou, kde na DPS může být naneseo malé množství či naopak velké množství pájky či sloučenin.

Nanesení pájecí pasty

Pájecí pasta se nanáší šablonovým tiskem. Šablony jsou trvanlivější než síta a lze nanášet silnější vrstvu pájecí pasty dle potřeby. Šablona se přikládá kontaktně přímo na substrát. Těrka s nastaveným úhlem sklonu je definovanou silou přitlačena k šabloně a pohybuje se po ní konstantní rychlostí, přičemž se před těrkou odrolává pájecí pasta. Část kinetické energie pohybující se šablony se předává pájecí pastě, která následně generuje hydraulický tlak a dochází k protlačení pájecí pasty aperturami v šabloně.

Důležité parametry jsou velikost odtrhu a rychlost odtrhu, která musí být dostatečná, aby se šablona dobře oddělila od nanesené pasty. Doporučuje se rychlost 10 mm/s dle literatury [23]. Tlak těrky, rychlost těrky by měla být od 12 mm.s⁻¹ do 200 mm.s⁻¹. Doporučený úhel těrky je 60 °C. Pro nanesení pájecí pasty se používá kovová těrka. Materiálem je tvrdá nerezová ocel. Tloušťka šablony definuje množství nanesené pasty. Pro tento proces se využívají šablony řezané laserem, které vytvoří velmi přesné motivy a dosahuje velkých přesností. Důležité je znát počet stěrů a cyklus čištění.

V tomto kroku mohou být chyby způsobeny opotřebením šablony. Dochází ke zvlnění, deformaci (prohnutí) těrky. Záleží na používané pájecí pastě, vhodnosti apertur. Zda má pájecí pasta vhodnou konzistenci, jestliže se špatně rozmíchá, může to mít za následek malé množství pájecí pasty na ploškách. Další faktor je okolní teplota a vlhkost. Teplota při použití pájecí pasty by se měla pohybovat cca. 25 °C. Nastavené hodnoty firmou honeywell jsou viz. kap. 5.5.3.

Kontroluje se zde, zda není špatně umístěná pájecí pasta, roztečení a rozmazání pájecí pasty. Další porucha nastane při nadbytku či nedostatku pájecí pasty. [23]



Obrázek 80: Zařízení pro šablonový tisk Accuflex

SPI (solder paste inspection - inspekce pájecí pasty)

„Existují 2 metody inspekce pájecí pasty a to 2D a 3D. Monitorují homogenitu a vystředění pájecí pasty. *2D inspekce* využívají jednu kameru, která snímá množství natištěné pasty na plošce. Inspekci musíme nejdříve naprogramovat (určení pozice a rozměrů plošek). Princip je takový, že kamera nasnímá oblasti s natištěnou pastou a podle odstínu se vyhodnotí poměr ploch s natištěnou pastou a předem definovanou plochou plošky. *3D inspekce* například pracuje na principu vyhodnocování obrazu z více kamer či pomocí laseru.“

Správná funkčnost závisí na životnosti, kalibraci, nastavení parametrů a také na zkušenostech operátora. [24]



Obrázek 81: Zařízení SPI pro kontrolu nanesení pájecí pasty po šablonovém tisku

Osazení DPS součástkami

Po nanesení pájecí pasty a kontrolou SPI, následuje osazování QFN pouzdra a dalších SMD součástek. Základní princip je stejný na všech osazovacích systémech => (Pick and place). Součástka je uchopena, vystředěna do polohy určené k zapájení a umístěna na danou kontaktní plošku na DPS. Úspěšnost osazení závisí na přesnosti provedení a splnění požadovaných rozměrových tolerancí (součástky, osazovacího zařízení). Nejdůležitější parametry jsou osazovací rychlost a přesnost, jež souvisí s nejmenší roztečí vývodů součástky. Musí se brát v úvahu použitelný typ součástek, velikost substrátu a počet využitelných zásobníků. Před každou výrobou se kontroluje funkčnost pipet, dostatek feedů a zda jsou součástky správně zabaleny. [23]

Mezioperační dílenská kontrola následuje ihned po osazení a v mnoha případech je prováděna strojově. Hrozí zde chyby osazení chybnou či nefunkční součástkou, nebo může být součástka vynechaná či špatně orientována.



Obrázek 82: Zařízení pro osazení DPS součástkami

Pájení přetavením

Pájecí zařízení pro bezolovnaté pájení musí splňovat několik požadavků. Dodat na pájený spoj dostatečné množství tepla a zaručit, že pracovní teplota nepřekročí stanovenou mez, aby nedocházelo k přehřívání a zničení pájených komponent. Musí se brát ohled na vrcholové teploty součástek, pájecí pasty a celého celku DPS. Při pájení přetavením je důležité zajistit, aby maximální teplota během procesu přetavení zůstala vždy nižší než teplota pájeného spoje. V našem případě by neměla přesáhnout 250 °C kvůli možné deformaci pouzdra. Tudíž je teplota regulována během procesu a výroby.

Důležitý faktor je teplotní profil. Představuje průběh teploty na čase po dobu pájení. Více v kap.5.2. Další kritický parametr je rychlost dopravníku. Při menší rychlosti dopravníku topné moduly musí méně topit. Při větší rychlosti dopravníku topné moduly musí více topit, aby se všechny součástky stihly prohřát na požadovanou teplotu. Musí se najít optimum kvůli spotřebě energie.

Hrozí zde chyby v řídicí jednotce, která reguluje teplotu vzduchu pomocí termočlánků. Když se porouchá, může dojít k výkyvům teplot například o 20 - 30 °C. Další hrozbou je lidský faktor, kdy obsluha nechá otevřenou pec a způsobí trvalé snížení teploty při procesu. To má za následek špatné zapájení DPS, které v tu chvíli prochází pájecí pecí. [19] [23]

Poruchy, které mohou nastat, jsou shrnuty v následujících bodech:

- špatně zapájená či nezapájená součástka
- zkrat či nadbytek pájky
- nedostatek pájky ve spoji
- zvedání součástek
- narušený pájený spoj (trhlina)
- chybějící součástka



Obrázek 83: Konvekční pec HELLER 1812EXL

AOI + Elektrické testování

Optická a elektrická kontrola je velmi důležitá, protože zachycení závady přímo ve výrobě znamená velmi vysoké úspory.

Optická kontrola má za úkol zjistit kvalitu pájených spojů, přítomnost všech součástek či přítomnost zkratů. Optická kontrola kamerou (AOI) je založena na porovnání součástek osazených a zapájených na DPS s normálovými vzorky. Základem procesu je získání obrazu kontrolovaného předmětu a jeho uložení do paměti. Následně se provede zpracování důležitých kritérií. Snímá se pomocí vidokamer CCD s vysokou rozlišovací schopností. Zda kontrolovaný předmět je v pořádku, rozhoduje matematický algoritmus, který naprogramuje programátor. Ale touto metodou není možné zachytit chyby, jako studené spoje, póry či povrchové znečištění. Dostatečně jsou zaznamenány chyby typu součástka mimo pájecí plošky, špatně smáčení povrchu, nedostatečné množství nanesené pasty a špatný tvar součástky. Je to metoda velmi nákladná, kde je nutné zaškolení. [1] [19] [23]

Špatnou funkci může způsobit velmi teplá DPS, která zamlží optiku a dojde ke zkreslení výsledků.



Obrázek 84: Zařízení pro automatickou optickou inspekci

Vnitroobvodové testování neboli in-circuit test. Monitoruje správnost součástek a připájení. Metoda zachycuje chyby výroby tím, že každý uzel testované desky se nakontaktuje pomocí jehlového pole a přenáší či snímá měřící signál z DPS do testovacího systému. Tato metoda má své nevýhody. Jedním z nich je relativně dlouhá doba přípravy programu a jehlového pole. Dalším aspektem je pořizovací cena. Předností ICT je rychlost testu a vysoké procento účinnosti testu. [1]



Obrázek 85: Zařízení pro vnitroobvodové testování

5.5.2 Statistické vyhodnocení defektů na produkčních DPS

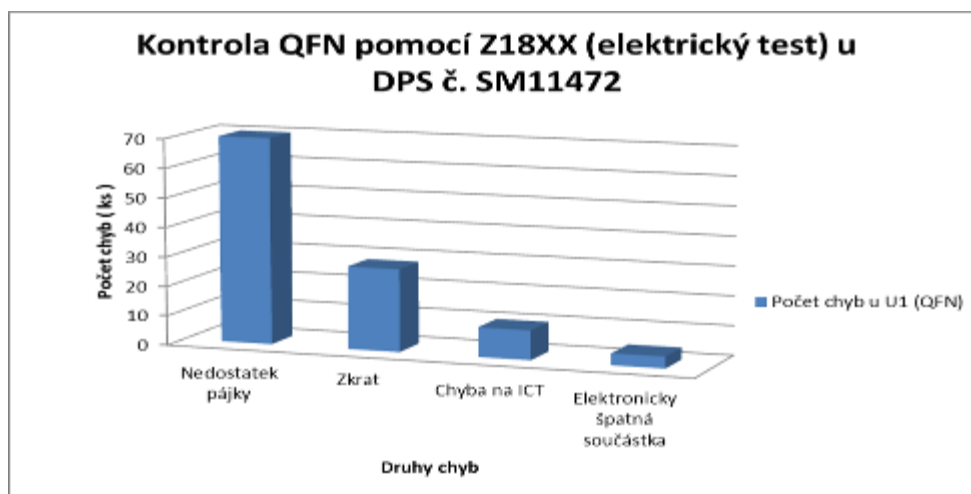
Tato část práce probíhala ve spolupráci s firmou Honeywell. Pro testování byly vybrány DPS č. SM10022 , č. SM11472 a č.SD4962DM3037. Práce je zaměřená na statistické vyhodnocení defektů detekované kontrolou SPI (inspekce pájecí pasty) a Z18XX (elektrický test). Nejprve na vybrané DPS byla pomocí šablonového tisku nanесena bezolovnatá pájecí pasta AIM NC257-2. Viz příloha 3. U každé DPS byla provedena inspekce pájecí pasty. V další fázi byly DPS osazeny osazovacím automatem a poslány do reflow pece pro zapájení. Poté byly dopraveny na AOI a elektrické testování. Získaná data jsou z období 1. 1. 2014 až 3. 4. 2015. Z důvodů zkoumání jen určených DPS se práce nezabývala chybami na ostatních součástkách ale pouze na QFN pouzdru. V tabulce č. 24 je uvedený přehled vybraných a testovaných DPS na zařízení ICT po období 1. 1. 2014 až 3. 4. 2015. Pro přehled vybraných a testovaných DPS na zařízení SPI nebyla data k dispozici. Výsledky testu jsou zobrazeny na obrázku č. 86 - 90.

Tabulka 24: Celkový přehled testovaných DPS na zařízení ICT

Přehled testovaných DPS na Z18XX		Testováno	Celkem OK	Scrap:	Chyby na QFN
		(ks)	(ks)	(ks)	(ks)
SM11472	celkem:	22187	21724	463	112
SM10022S	celkem:	24233	24013	220	20
DPS č.SD4962DM3037 byla testována na jiném testovacím zařízení ICT - LH					
SD4962DM3037	celkem:	6768	6732	36	109

Elektrického testování – ICT (vnitroobvodové testování)

Je to test, zda součástky na DPS jsou přítomny, zda jsou ve správných hodnotách a tolerančních mezích a jestli na DPS nejsou zkratky a přerušení. Každá součástka je pomocí jehel samostatně testována testovacím signálem a probíhá testování a případná identifikace závady. [19]



Obrázek 86: Graf zobrazení chyb na DPS č. SM11472 pomocí ZX18XX

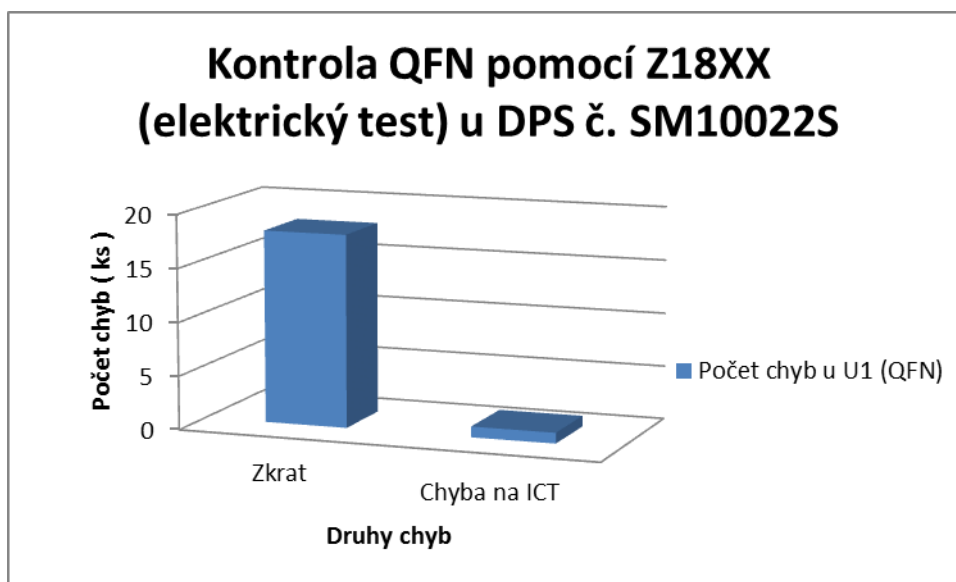
Na obrázku 86 vidíme, že nejvíce vyskytující se chyba u daných desek je nedostatek pájky či zkrat. Další chyby jsou: chyby na ICT, elektricky špatná součástka.

„Nedostatečné množství pájky – množství natisknuté pájecí pasty je menší, než by odpovídalo otvoru v šabloně nebo po přetavení nejsou vývody součástek pokryty pájkou. Možnou příčinou je šablona sítotisku či nedostatečné vztlínání pájky. Doporučuje se zkontrolovat poměr ploch otvorů šablony, který by měl být $> 0,66$. Poměr stran by měl být $> 1,5$. Nastavíme také parametry tisku, kde snížíme rychlost tisku, aby byl čas na natlačení pasty do otvoru šablony a také tlak těrky. Z pohledu pájecího profilu se doporučuje použít pájecí profil s větší prodlevou v místě vyrovnání teplot, který minimalizuje celkové teplotní rozdíly před zónou přetavení. Také se doporučuje zkontrolovat viskozitu pájecí pasty, zda pasta roluje napříč, nebo pouze klouže ve směru tisku.“ [4] [14]

Důvodem vzniku zkratu je nadměrné množství pájecí pasty, špatně navržený motiv DPS, velké velikosti apertury v šabloně, špatná rovinnost DPS, malé rozměry pájecích plošek. Pro redukci zkratu může být použito menší množství pájecí pasty, navržení jiné šablony, přenastavit tlak těrky. [4] [14] [19]

Falešné chyby jsou způsobeny chybnou funkcí systému ICT (vnitroobvodové testování) systému a závisí na nastavení výstupních hodnot (toleranční meze podle kvalitativních norem) a na schopnosti automatu eliminovat tato falešná hlášení.

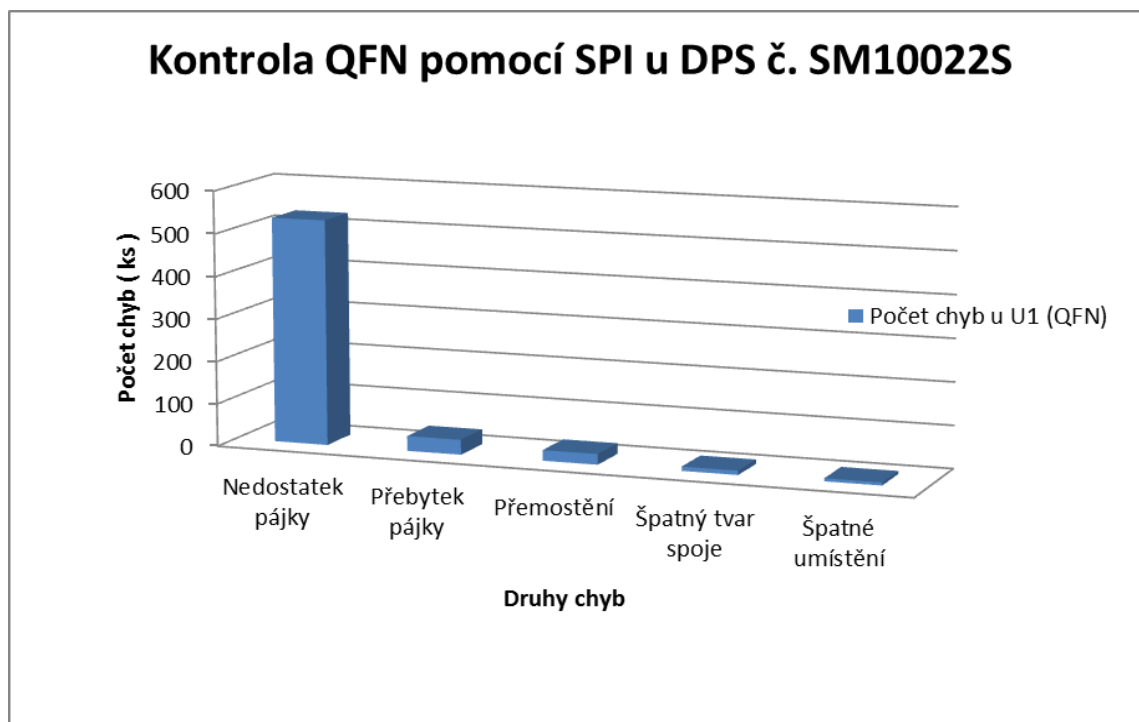
Elektricky špatné součástky neovlivníme z důvodu nákupu součástek od jiných firem.



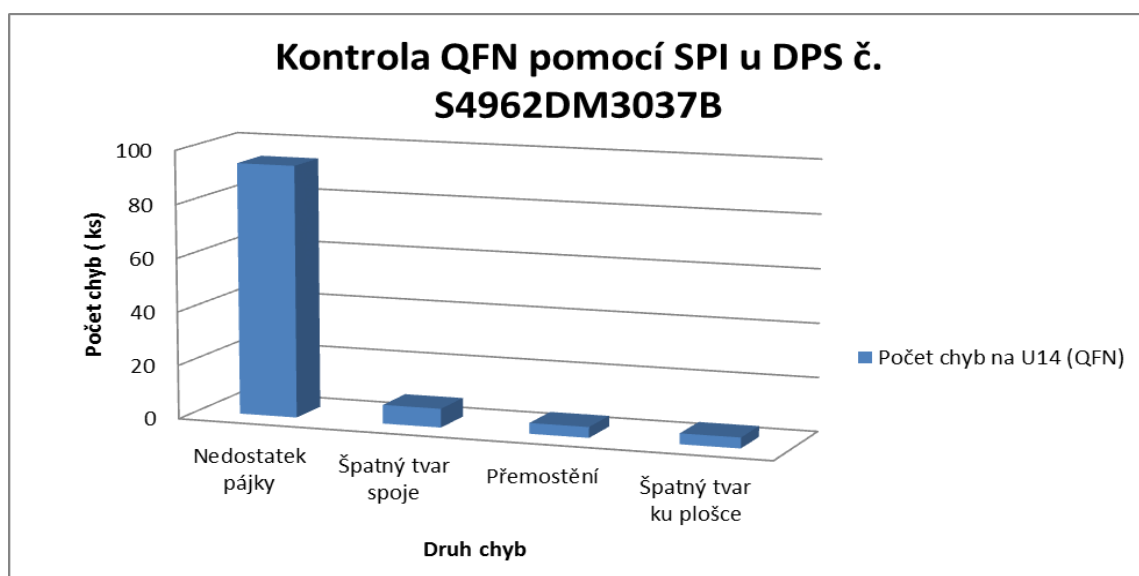
Obrázek 87: Graf zobrazení chyb na DPS č. SM10022S pomocí ZX18XX

SPI (solde paste inspection) – inspekce pájecí pasty

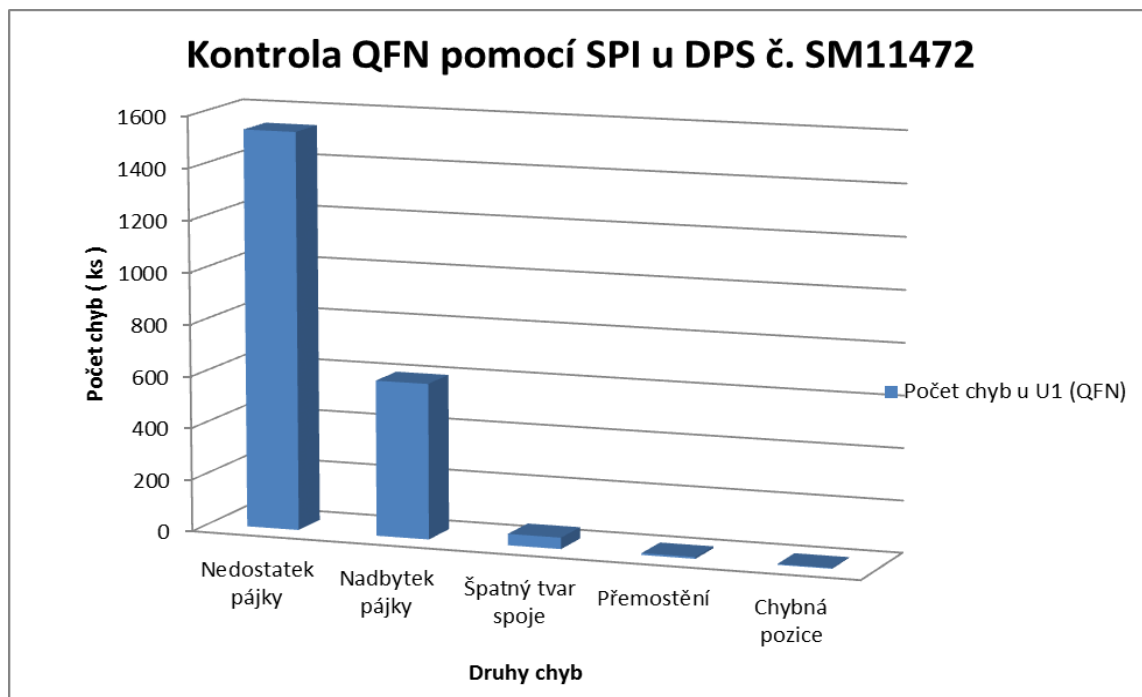
„Existují 2 metody inspekce pájecí pasty a to 2D a 3D. 2D inspekce využívají jednu kameru, která snímá množství natištěné pasty na plošce. Inspekci musíme nejdříve naprogramovat (definování pozice a rozměrů plošek). Princip je takový, že kamera nasnímá oblasti s natištěnou pastou a podle odstínu se vyhodnotí poměr ploch s natištěnou pastou a předem definovanou plochou plošky. 3D inspekce například pracuje na principu vyhodnocování obrazu z více kamer či pomocí laseru.“ [24]



Obrázek 88: Graf zobrazení chyb na DPS č. SM10022 pomocí SPI



Obrázek 89: Graf zobrazení chyb na DPS č. SD4962DM3037 pomocí SPI



Obrázek 90: Graf zobrazení chyb na DPS č. SM11472 pomocí SPI

Na obrázku 88 - 90 vidíme, že nejvíce vyskytující se chyba u daných desek je nedostatek pájky či nadbytek pájky. Další chyby jsou: špatný tvar spoje a přemostění (zkrat).

Přebytek pájecí pasty – přebytek pájecí pasty po přetavení způsobuje zkrat mezi kontakty. Způsobené chyby mohly vzniknout kvůli špatnému sesouhlasení šablony a DPS při tisku, další důvod je v nesprávném nastavení tlaku těrky a velikosti apertury v šabloně. Viskozita a vhodnost pájecí pasty zde hraje také určitou roli. Musíme dávat pozor na vliv teploty, vlhkosti a způsobu skladování. Danou chybu odstraníme snížením množství pájecí pasty na plošce, optimalizováním procesu nanášení pájecí pasty.

„Přemostění (Můstky) – vytvoření zkratu z pájky mezi ploškami či vývody součástek. Možná příčina může být způsobena nepřesným nanášením pájecí pasty přes šablonu, rozmáznutím a stečením pasty, špatným osazením součástky, také znečištěním pájecí pasty nebo velkým množstvím pasty či viskozitou pájecí pasty. Další příčinou může být chybný návrh DPS, nepřítomnost nepájivé masky. Potlačení můstků se provádí použitím vhodné nepájivé masky. Mezi ploškami by mělo být malé množství nepájivé masky.“ [20]

Z důvodu těchto zjištěných chyb se jeví vhodné zaměřit se na testování a optimalizaci parametrů šablonového tisku.

5.5.3 Změna parametrů šablonového tisku

Optimalizování a testování parametrů šablonového tisku probíhalo ve spolupráci firmy Honeywell. Dodaný a využitý materiál je součástí výroby. Nejprve bylo nutné se seznámit s problematikou procesů osazení a pájení QFN pouzder. V kap.5.5.2. je zobrazeno statistické vyhodnocení defektů detekovaných kontrolou SPI a ICT. Dle statistického vyhodnocení, nejvíce chyb bylo způsobeno nedostatkem pájky, nadbytkem pájky a zkraty. Tyto chyby mají svůj zdroj v procesu nanesení pájecí pasty šablonovým tiskem. Tyto chyby měly za následek proměření a optimalizování parametrů šablonového tisku.

Parametry a podmínky při testování:

Testování proběhlo na 11 DPS č. S4962V3158B. Typ materiálu: FR4. Oboustranná DPS.

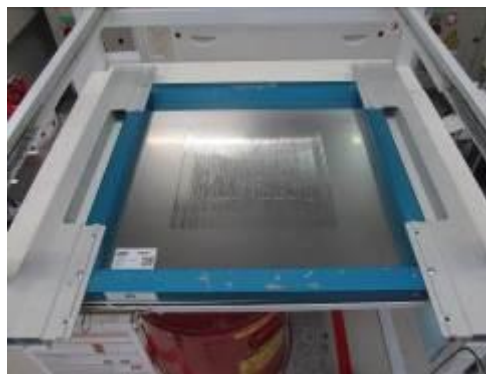


Obrázek 91: Testovací DPS č. S4962V3158B

Šablona byla vyhotovena (řezaná) pomocí laseru firmou DEK. Tloušťka šablony je 150 μm . Výrobce udává životnost 30 000 cyklů. Šablona a její uchycení v rámu je zobrazena na obrázku 92 a 93.



Obrázek 92: Testovací šablona a její uchycení pro DPS č. S4962V3158B



Obrázek 93: Uchycení šablony pro tisk pájecí pasty

Těrka má délku 30 cm. Musí se dbát na tvrdost těrky, protože čím jemnější je motiv, tím tvrdší musí být těrka. Když má těrka větší tvrdost, dochází k zmenšení životnosti šablony.

Použitá pájecí pasta je od firmy AIM solder, konkrétně AIM NC257-2. Jedná se o pastu typu 4. Její vlastnosti, parametry a doporučení pro tisk pájecí pasty jsou v příloze. 3.

Daný proces testování je stejný jako při běžné výrobě. Viz. Obrázek 79. Do testování nebyl zahrnut následný proces osazení a pájení z časového důvodu a nákladů. Test probíhal takto:

- nejprve se provede čištění DPS
- umístění DPS na dopravník
- nanesení pájecí pasty na DPS šablonovým tiskem dle parametrů
- kontrola SPI
- opět čištění DPS od pájecí pasty a zbytků
- změna požadovaných parametrů

Pro pozorování byly určeny tyto hlavní parametry:

- rychlosti tisku
- tlak těrky
- rychlost odtrhu od DPS
- vzdálenost odtrhu
- počet čištění

Vzdálenost odtrhu 3mm byla pro všechna měření stejná. Při odtrhu vzniká průhyb, který musí být dostatečný na to, aby se šablona odtrhla dostatečnou velikostí po nanesení pájecí pasty pro plošky na středu DPS. Výrobce pájecí pasty uvádí rozmezí hodnot odtrhu od 0,75 do 2 mm. Ale vzdálenost odtrhu spíše záleží na velikosti DPS. Čím menší je DPS, tím je vzdálenost odtrhu menší a naopak.

V zařízení pro šablonový tisk probíhá čištění šablony zespodu po 6 DPS. Tento parametr zůstane po celou dobu měření stejný. Princip tkví v namočení papíru pro čištění, následně papír přetře šablonu, papír se pootočí na suchou stranu a pomocí vakua se odsává pasta z otvorů. Běžně se počet čištění ve výrobě pohybuje kolem 4 až 6 čištění.

Úhel těrky 60 ° a teplota okolí 24 °C zůstává nezměněná po celou dobu měření. Rychlost tisku se při měření pohybovala v rozmezích hodnot doporučených výrobcem.

U prvních dvou DPS, v sériové výrobě, se předpokládá, že budou nedostatečně vykazovat požadované parametry. Záleží na čištění a vymytí šablony v myčce. Může se stát, že zbyde pájecí pasta v některých otvorech. Při změnách jednotlivých testovaných parametrů se hodnoty pohybovaly vždy v rozmezí doporučených hodnot od výrobce pájecí pasty. Viz. příloha 3. Výjimku tvoří změna vzdálenosti odtrhu, která je popsána výše.

Tisk pájecí pasty č. 1

Pro první testování a tisk se nastavily hodnoty parametrů, které se běžně používají ve výrobě. (originální nastavení - původní hodnoty). Rychlost tisku je nastavena na 60 mm/s. Tlak těrky je 5,5 kg. Rychlost odtrhu je 10 mm/s.

Tisk pájecí pasty č. 2

Rychlost tisku změněna na 30 mm/s. Tlak těrky 5,5 kg a rychlost odtrhu 10 mm/s je nezměněn.

Tisk pájecí pasty č. 3

Rychlost tisku změněna na původní hodnotu 60 mm/s. Tlak těrky změněn na 2,5 kg, který je pod hranicí hodnoty 3 kg, doporučených výrobcem. Rychlost odtrhu 10 mm/s zůstává stejná. Následně po začátku měření se potvrdilo, že tlak těrky 2,5 kg je velmi malý a nedocházelo k protlačení pájecí pasty přes apertury. Pájecí pasta zůstávala na povrchu šablony. Proto byl testovací tlak zvýšen na 3,5 kg.

Tisk pájecí pasty č. 4

Rychlost tisku je nastavena na 60 mm/s. Tlak těrky vrácen na 5,5 kg. Rychlost odtrhu změněn na 1 mm/s.

Výsledky měření

Výsledky měření jsou zobrazeny na obrázku 94. Průměrné hodnoty testovaných parametrů a směrodatné odchylky jsou zaznamenány v tabulkách č. 25 - 28. Při porovnání jednotlivých výsledků je největší rozdíl vidět při změně tlaku těrky, která působí na šablonu. Další změny parametrů nezpůsobily velké rozdíly.

Tabulka 25: Výsledky pro 1. měření parametrů šablonového tisku

1.měření_původní hodnoty	Relativní objem pájecí pasty	Výška pájecí pasty	Plocha pokrytá pájecí pastou
	(%)	(μm)	(%)
Průměrné hodnoty	101,589	157,727	98,503
Směrodatná odchylka	6,227	5,940	7,393

Tabulka 26: Výsledky pro 2. měření parametrů šablonového tisku_rychlost tisku 30 mm/s

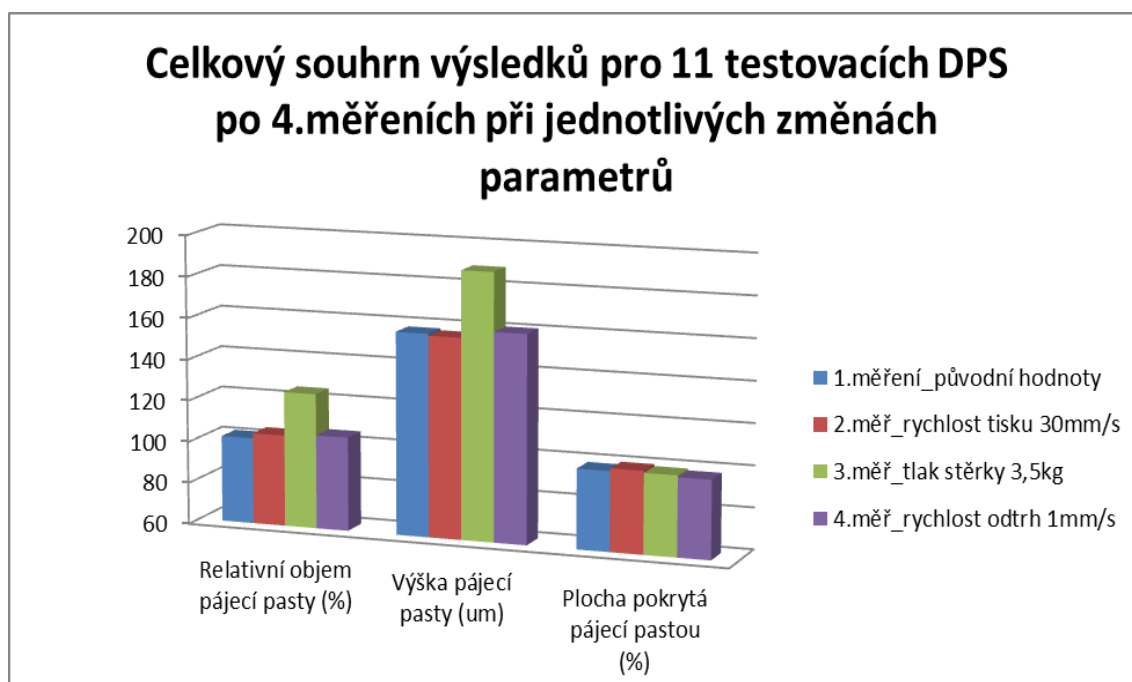
2.měření_rychlost tisku 30mm/s	Relativní objem pájecí pasty	Výška pájecí pasty	Plocha pokrytá pájecí pastou
	(%)	(μm)	(%)
Průměrné hodnoty	104,031	156,821	99,766
Směrodatná odchylka	0,358	0,887	0,227

Tabulka 27: Výsledky pro 3. měření parametrů šablonového tisku_tlak těrky 3,5 kg

3.měření_tlak těrky 3,5 kg	Relativní objem pájecí pasty	Výška pájecí pasty	Plocha pokrytá pájecí pastou
	(%)	(μm)	(%)
Průměrné hodnoty	125,148	188,806	98,845
Směrodatná odchylka	0,690	1,339	0,411

Tabulka 28: Výsledky pro 4. měření parametrů šablonového tisku_rychlost odtrhu 1 mm/s

4.měření_rychlost odtrhu 1mm/s	Relativní objem pájecí pasty	Výška pájecí pasty	Plocha pokrytá pájecí pastou
	(%)	(μm)	(%)
Průměrný objem pasty	105,263	160,527	97,977
Směrodatná odchylka	0,539	0,480	0,352



Obrázek 94: Výsledky pro testování a optimalizaci parametrů šablonového tisku

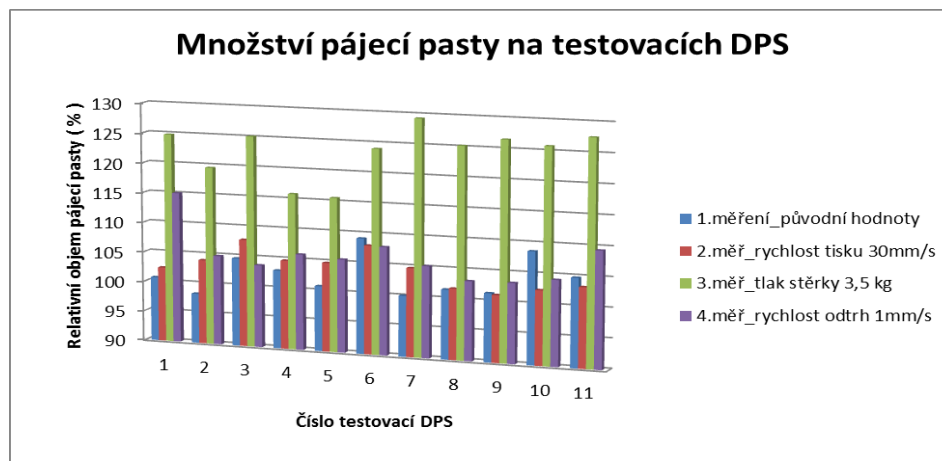
Jak už bylo uvedeno na předchozí stránce, největší rozdíl v hodnotách parametrů vykazuje změna tlaku těrky a to z 5,5 kg na 3,5 kg. Změna způsobí zvýšení objemu pájecí pasty v průměru o 24 % a zvýšení výšky pájecí pasty o 30 μm . Důvodem je skutečnost, že těrka nemá takový tlak na šablonu a proto těrka nemůže odrolovat dané množství pájecí pasty z šablony a zachovat příslušný tvar natištěné pájecí pasty. Výsledkem, jak můžeme vidět na obrázku 94, může být nadbytek pájecí pasty a vysoká výška pájecí pasty.

Při každé změně parametrů se zvýšil objem i výška nanesené pájecí pasty.

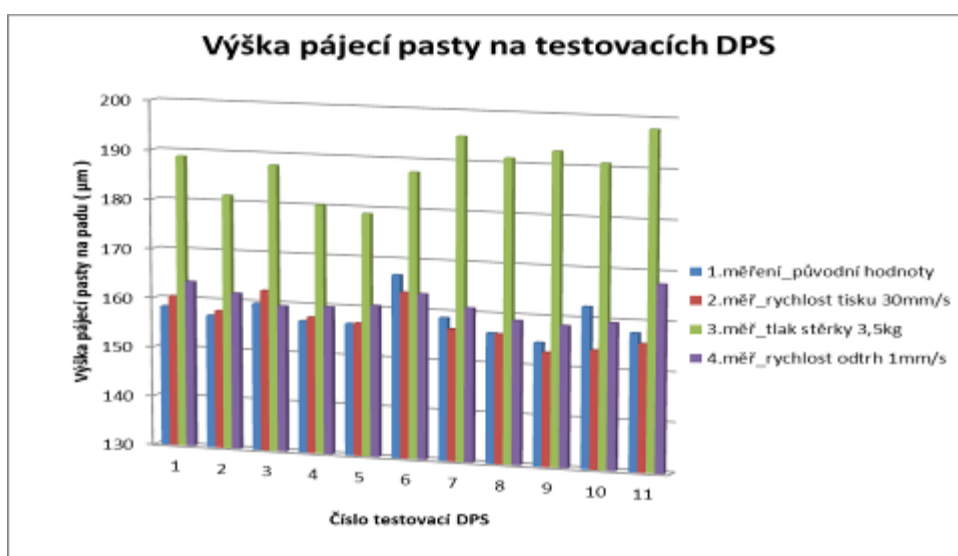
Výjimka nastala u změny rychlosti tisku z 60 mm/s na 30 mm/s. Při dané změně se výška pájecí pasty sníží o 1 μm . Objem pájecí pasty se zvýší o 2,5 % na 104,031 %. Tato skutečnost potvrzuje, že při snížení rychlosti tisku dochází k lepšímu vyplnění vnitřního prostoru apertury. Také můžeme vidět lepší výsledky pokrytí plošky pájecí pastou. To deklaruje obrázek č. 97. Nevýhoda je snížení rychlosti tisku, která způsobí zpomalení výroby.

Z grafu je patrný rozdíl při změně rychlosti odtrhu. Rychlost odtrhu musí být dostatečná, aby se šablona dobře oddělila od nanesené pájecí pasty a zůstal zachovaný nanesený obrazec. Rychlý odtrh způsobí, že na ploškách zůstane malé množství pájecí pasty. Při pomalém odtrhu, jako je tomu v tomto měření, na ploškách zůstane větší množství pájecí pasty. Při změně rychlosti odtrhu z 10 mm/s na 1 mm/s se zvýšil objem pájecí pasty na plošce o cca. 4 %. Tedy na 105,263 %. Výška pájecí pasty se zvýšila v průměru o 2,8 μm . Tedy na 160,527 μm .

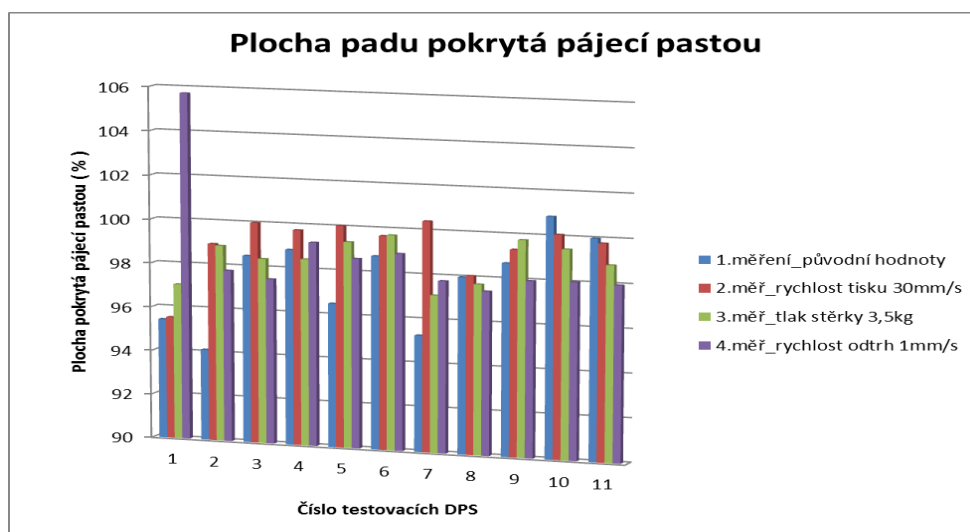
Na obrázku 95 - 97 jsou zobrazeny výsledky měření pro každou DPS jednotlivě.



Obrázek 95: Množství pájecí pasty na QFN pouzdru



Obrázek 96: Výška pájecí pasty na QFN pouzdru



Obrázek 97: Plocha pokrytá pájecí pastou na QFN pouzdru

Při měření objemu pájecí pasty, výšky nanesené pájecí pasty a pokrytí plošek pájecí pastou byly naměřeny maximální a minimální hodnoty pro jednotlivé DPS. Shrnutí je k nalezení v tabulce č. 29.

Tabulka 29: Maximální a minimální změřené výsledky jednotlivých měření

			Pořadí měření			
			1.	2.	3.	4.
Objem pájecí pasty	max.	(%)	125	117	146	125
	min.	(%)	74	68	63	78
Výška pájecí pasty	max.	(μm)	194	180	233	194
	min.	(μm)	123	118	122	131
Pokrytí pájecí pastou	max.	(%)	109	109	108	113
	min.	(%)	75	83	70	84

Během měření na 11 DPS (44x kontrola SPI) se nevyskytla chyba na ploškách QFN pouzdra. Chyby se týkaly jiných součástek např. plošky pro SMD součástky (rezistor). Většina chyb byla způsobena nadbytkem pájky, chyba ve tvaru nanesené pájecí pasty či výšce nanesené pájecí pasty. Při zmenšení tlaku třerky, měření č. 3, se vyskytla chyba v podobě nedostatku či chybějící pájecí pasty na ploškách.

5.6 Diskuze

Prvním cílem práce bylo navrhnout metodu měření teplot, která by byla nejúčinnější, dostatečně spolehlivá a přesná. Porovnány byly termočlánky typu K a termovizní kamera Guide EasIR – 9. Testování probíhalo na pájecí peci DIMA SMRO-0180 . Po pájení přetavením a nastavení optimálního teplotního profilu, kde PWI hodnoty se pohybovaly kolem 102 %, se porovnaly výsledky z obou metod. Časy pro porovnání teplot v profilu byly 103 s, 156 s, 190 s a 251 s. Rozdíl naměřených teplot se pohybuje v rozmezí 3,8 – 13 °C. Ve výrobě i pro potřeby diplomové práce se nejlépe uplatní termočlánky typu K. Termočlánky jsou méně náročné na manipulaci a způsob měření. V případě IR pece i v budoucím měření na konvekční peci Heller, se nemusí zvedat víko pece a má větší rozsah měřitelných teplot.

Další část probíhala ve spolupráci s firmou Honeywell. Měření a analyzování teplotních profilů se uskutečnilo na produkčních DPS. Cílem měření bylo získání pájecího profilu, který se bude svými parametry přibližovat k doporučeným parametrům od výrobce pájecí pasty a normy IPC7093. Následně byly porovnány teplotní profily dosažené pomocí horkovzdušné pece HELLER 1812 EXL, IR pece DIMA SMRO-0180 (VUT) a simulací v SolidWorks. Výsledné teplotní profily se výrazně neliší. Teplotní profily, změřené na konvekční peci a v programu SolidWorks, mají shodný tvar. Průběh ohřevu i chlazení má lineární tvar. Lineární nárůst teploty nám dává jasnější a lesklejší spoje. Vyskytuje se méně problémů s pájitelností. Rozdíl mezi teploty byl cca. 2 - 5 °C. Rozdíl vidíme u teplotního profilu měřeného na IR peci. Teplotní profil vykazuje známky oblasti pro vyrovnání a nemá lineární gradient ohřevu. Je kratší z důvodů rozdílné konstrukce pece, limitují ji 3 teplotní zóny. Na IR peci bylo dosaženo menších vrcholových teplot. Rozdíl oproti konvekční peci je cca 7 °C. Při testování byly dosaženy hodnoty, které byly téměř vždy v rozmezí doporučených hodnot uvedených výrobcem pájecí pasty a v normě IPC 7093. Pro další pokračování práce a optimalizování pájení přetavením by bylo zajímavé zkusit přidat ochrannou atmosféru dusíku a pozorovat změny důležitých parametrů. Dle teorie by mělo dojít k rozšíření procesního okna, lepší smáčivosti, roztékavosti, omezení zkratů a potlačení oxidace. Celkově by mělo dojít k snížení vad pájeného spoje a zvýšení spolehlivosti. Pro vyhodnocení vzhledu spoje a určení tloušťky IMC vrstvy se využily optické mikroskopy a elektronový mikroskop. Tloušťky pájecí pasty po pájení se pohybovaly od 37 do 46 μm. Rozdíl může být způsoben neoptimálním nastavením parametrů šablonového tisku, homogenitou tepla v peci, tepelnou kapacitou míst na DPS, povrchovou úpravou DPS (roztékavost, smáčivost povrchu) aj. Nalezené vady byly ve formě dutin či voidů. Další vada byla ve formě nesmočení boční hrany plošky QFN pouzdra. Možný důvod je v malé aktivitě tavidla v pájecí pastě, rychlým posunem DPS v peci při pájení přetavením. Tuto chybu však Honeywell ignoruje a soustředí se na zapájení BTC plošky pro odvod tepla (BTC). Pomocí elektronového mikroskopu byly získány snímky struktury jednotlivých vrstev pájených spojů na QFN pouzdra a také tloušťky IMC vrstvy, které měly hodnotu 1,25 μm pro DPS č. SM10019. Pro

DPS č. IO37102 byla určena průměrná tloušťka IMC vrstvy 3,99 μm . Na druhém vzorku, stejné DPS, byla naměřena tloušťka IMC vrstvy 6,63 μm . Tloušťky pozorovaných vzorků DPS č. IO37102 se liší o 2,64 μm . Rozdíl může být způsoben delším časem působení tepla nad 220 °C, který se několikrát opakoval při optimalizování teplotních profilů a to po dobu jednoho týdne. Testovací DPS s QFN pouzdry byly podrobeny rentgenové kontrole. Ze snímků vyplývá, že množství voidů pod pouzdem QFN je menší jak 25 %. Hodnota vyhovuje limitům uváděných v praxi, ale v současné době není jasná shoda nad tím, jak velké množství voidů je akceptovatelné. Trend do budoucna je tyto voidy potlačovat. Jedním způsobem je použít zařízení s přidanou zónou obsahující vakuum.

Dalším cílem bylo modelovat v programu SolidWorks přestup tepla 3D modelu QFN pouzdra. Následně porovnat simulovaný teplotní profil s profilem naměřeným na konvekční peci. Z porovnání je patrné, že nebyly zaznamenány příliš velké odchylky a simulovaný teplotní profil kopíruje naměřený profil. Pro další pokračování práce by stálo se zaměřit na modelování celé tepelné zóny či zařízení a simulovat nejen rozložení teplot v peci, ale i proudění horkého vzduchu z topných zdrojů (ventilátorů či trysek).

V poslední části bylo cílem navrhnout technologický postup pájení QFN pouzder na produkčních DPS. Dané měření a postup probíhaly ve firmě Honeywell. Technologický tok a vlastnosti každého procesu podílející se na pájení QFN pouzder je popsán v kapitole 5. 5. Součástí určení postupu bylo vyhledat nejčastěji vyskytující se chyby. Nejčastější chyby byly způsobeny nedostatkem či nadbytkem pájecí pasty a zkraty. Tyto chyby mají svůj zdroj v procesu nanesení pájecí pasty šablonovým tiskem. Daly nám podnět k přenastavení a optimalizování procesu šablonového tisku. Pro měření byly vybrány parametry rychlost tisku, tlak těrky a rychlost odtrhu. Největší rozdíl byl způsoben při změně tlaku těrky na šablonu. Pro všechna měření byla charakteristická větší hodnota výšky pájecí pasty, která byla větší jak tloušťka šablony. Tudíž nejvíce chyb by mělo být způsobeno nadbytkem pájky. Dle statistického vyhodnocení, byl však největší podíl chyb způsoben nedostatkem pájky. Tato odlišnost je dána typem DPS a návrhem šablony. Tato neshoda DPS byla zapříčiněna nedostupností neosazených DPS pro opakování statistického vyhodnocení. Pro optimalizaci šablonového tisku se muselo přejít na jiný typ DPS. Každá DPS má svoji originální šablonu s určenou tloušťkou a rozměry apertury. Určitou roli hraje i nastavení parametrů šablonového tisku, které se mohou lišit dle typu DPS.

Pro další měření a optimalizování parametrů by bylo zajímavé změnit rychlost tisku na 45 mm/s, tlak těrky na 6 až 7 kg, rychlost odtrhu na 12 mm/s a návrh šablony s menší tloušťkou i optimálnějšími hodnotami area a aspect ratio. Dle mého názoru by při takové rychlosti tisku docházelo k lepšímu protlačení a zaplnění apertury, tlak těrky by se postaral o lepší odrolování pájecí pasty a zamezení vysoké výšky nanesené pasty. Výška nanesené pájecí pasty by se blížila tloušťce šablony. Problémem by však mohla být deformace těrky během tisku. Při zrychleném odtrhu by se snížilo množství pájecí pasty, ale muselo by se více dohlížet na zachování tvaru a výšky pájecí pasty. Pro možné budoucí optimalizování

parametrů šablonového tisku by bylo zajímavé zaměřit se na pozorování rolování pájecí pasty a jeho vlivu na výsledky parametrů šablonového tisku.

Více měření na konvekční peci HELLER 1812EXL (HONEYWELL) pro optimalizování teplotních profilů nebylo možné z důvodu časového vytížení pájecího zařízení ve výrobě. Zpomalení či zastavení výroby pro účely měření nebylo možné. Měření teplotních profilů mohlo probíhat pouze při údržbě a NPI (zavádění nového produktu).

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá technologickými postupy pájení pouzder QFN ve firmě Honeywell.

V teoretické části byla prostudována problematika pájení přetavením s větším zaměřením na pájení pouzder QFN.

V praktické části byla navržena metoda měření teploty. Nejlepší výsledky vykazovala metoda dotyková, přesněji řečeno profiloměry s termočlánky typu K.

Další problematikou bylo proměření a optimalizace teplotních profilů QFN pouzdra u vybraných DPS. Optimalizování probíhalo na konvekční peci HELLER 1812EXL a IR peci DIMA SMRO-0180. Změřené profily se pohybovaly v rozmezích hodnot procesního okna doporučených výrobcí a norem IPC7093. Při optimalizaci teplotního profilu na IR peci DIMA SMRO-0180, dané výsledky byly ovlivněny konstrukcí pece.

Vzhled spoje QFN pouzdra odpovídal normám a předpokladům. Vyskytující se chyby byly ve formě dutin či voidů. Pomocí elektronového mikroskopu byla určena tloušťka intermetalické vrstvy 1,25 μm pro DPS č. SM10019 a pro DPS č. IO37102 byla určena průměrná tloušťka IMC vrstvy 3,99 μm . Byla provedena i prvková analýza a na obrázcích jsou zvýrazněny vrstvy daného vzorku z mikrovýbrusu.

V programu SolidWorks byl namodelován 3D model přestupu tepla QFN pouzder a simulován teplotní profil při stejných okolních podmínkách jako při měření ve výrobě.

V poslední části diplomové práce byl popsán a analyzován postup pájení QFN pouzder na produkční DPS. Ze statistického vyhodnocení defektů byly určeny nejčastěji vyskytující se chyby. Tyto chyby byly např. nedostatek či nadbytek pájky a zkraty. Bylo provedeno optimalizování a analýza parametrů šablonového tisku. Z naměřených hodnot vyplývá, že největší vliv na relativní objem a výšku pájecí pasty má tlak těrky a tloušťka šablony.

V této práci bylo analyzováno několik vlivů na pájení QFN pouzdra a dle výsledků zkoušek byla zpracována doporučení na nastavení zařízení. S příchodem nových technologií a zařízení se můžou výsledky testovaných vlivů lišit.

Další možné pokračování práce je testování jiných parametrů šablonové tisku, aplikace DOE (Design of Experiment) pro optimální nastavení jednotlivých parametrů zařízení šablonového tisku a optimalizování teplotních profilů na modernějších a výkonnějších pájecích pecích a simulací přestupu a rozložení tepla v 3D softwaru (SolidWorks, Ansys).

7 SEZNAM LITERATURY

- [1] ABEL, Martin. *SMT: Technologie povrchové montáže*. 1. vyd. Pardubice: Nakladatelství Platan, 2000, 246 s. ISBN 80-902-7331-9.
- [2] BRZOBOHATÝ Lukáš: *Měření teploty*. Brno, 2011. 19s., CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.
- [3] BUŘIVAL, T. *Opravy DPS s BGA a FC pouzdry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [4] COOKSON ELECTRONICS. *DPS - plošné spoje od A do Z: odborný časopis pro vývoj a výrobu v oboru elektroniky. Řešení problému s Cookson Electronics - nedostatek pájecí pasty* [online]. 2012, roč. 2, č. 2, s. 1 [cit. 2014-12-14]. DOI: 1804-4891. Dostupné z: < http://www.dps-az.cz/casopis_online/2012/02/index.html?pageindex=42 > >
- [5] DOSEDLA, M. *Vliv integrálu teploty a času pájení na kvalitu pájeného bezolovnatého spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2013. 59 s., Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Jiří Starý, Ph.D..
- [6] HLAVATA, M. *Možné chyby a kontrolní metody v elektrotechnické montáži* [online]. Praha, 2014 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: < <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/24080/F3-BP-2014-Slavata-Michal-prace.pdf?sequence=3> >. Bakalářská práce
- [7] HUBÁLEK, J. a ADÁMEK, M.. *Mikrosenzory a mikromechanické systémy* [online]. Brno: VUTUM, 2011 [cit. 2014-12-17]. Dostupné z: < http://www.umel.feec.vutbr.cz/metmel/studijni-pomucky/METMEL_24_S_BMMS_Mikrosenzory_a_mikromechanicke_systemy.pdf >
- [8] IEC 7093. *Design and Assembly Process Implementation fot Bottom Termination Components*. Bannockburn, Illinois: IPC, 2011.
- [9] JIRÁK, J., HAVLÍČEK, S., ROZSIVALOVÁ, Z. *Diagnostika a zkušebnictví*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002.
- [10] MALÍK, D. *Zpracování dat z termokamery*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 66s. Vedoucí diplomové práce byl Ing. Miloslav Richter, Ph.D.
- [11] MERENDA, J. *Bezdotykové měření povrchových teplot v průběhu soustružení*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 84 s. 2 přílohy. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Polzer, Ph.D..

- [12] OTÁHAL, A. *Výzkum jakosti pájených spojů u pouzder BGA a QFN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 68 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..
- [13] Periodická tabulka. *Mendělejevova periodická soustava prvků* [online]. 2015 [cit. 2015-05-2405-24]. Dostupné z: < <http://www.prvky.com/periodicka-tabulka.html>>
- [14] PROCHÁZKA, M. *Vliv rozdílné tepelné kapacity DPS a součástek na podélný teplotní profil u pájení přetavením* – diplomová práce. Brno 2011. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D. FEKT VUT v Brně.
- [15] PSOTA, B., SZENDIUCH, I. Simulace tepelných vlastností pouzder QFN a BGA. *Slaboproudý obzor* [online]. 2014, 70(1) [cit. 2015-05-24]. ISSN 2336-5773. Dostupné z: <http://www.slaboproudyobzor.cz/files/20140101.pdf>
- [16] SCHNEDERLE, P. *Optimalizace procesu výroby DPS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [17] SEELIG, Karl, Tim O'NEILL a AIM SOLDER. Minimalizace voidů pod BTC komponenty. *DPS: Elektronika od A do Z* [online]. 2015, 6(2): 36-37 [cit. 2015-05-24]. ISSN 1805-5044. Dostupné také z: <<http://www.dps-az.cz/casopis-online/2015/02/#p=38>>
- [18] SOVA, J., KOVÁŘ, J. Termokamery a pyrometry. *Automa* [online]. 2014 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: < <http://automa.cz/termokamery-a-pyrometry-52891.html>>
- [19] STARY, J.; ZATLOUKAL, M.; STEJSKAL, P. *Montážní a propojovací technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. 262s
- [20] STEJSKAL, P. *Predikce spolehlivosti pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 10 s. Vedoucí dizertační práce: prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
- [21] STRAPKO, J. *Měření teplotních profil SMD pouzder*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 94 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [22] STRUČOVSKÝ, ALEŠ. *Analýza rozložení teplotního profilu v pájecí peci pomocí systémů CAE*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2013. 62 s., 5 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Maxa, Ph.D.
- [23] SZENDIUCH, I. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Vyd.1. Brno: VUTIU, 2006, 379 s. ISBN 80-214-3292-60.

- [24] ŠIMEČEK, O. *Problematika šablonového tisku pájecí pasty pro součástky s malou roztečí vývodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 62s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [25] ŠVÁB, M. *Optimalizace procesu montáže pouzder QFN*. Brno Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 62 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.
- [26] Vega3 XM. Tescan [online]. 2012 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <
<http://www.tescan.com/cz/produkty/vega-sem/vega3-xm>>
- [27] VYROUBAL, P., MAXA, J. *Trojrozměrné modelování a simulace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 204 s.

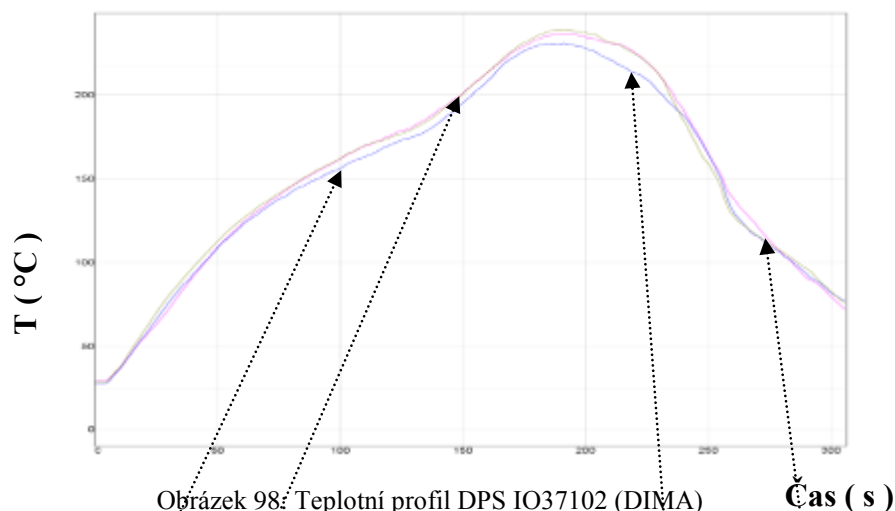
8 SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

AR	„Aspect Ratio“ Poměr stran
BTC	„Bottom Termination Components“ Dolní kontaktní ploška
DPS	Deska plošných spojů
ENIG	Technologie kombinující nanesení chemického niklu a poté vrstvy zlata
HAL	Žárové nanesení pájkou definované tloušťky na měděný podklad
ICT	„In Circuit Test“ Vnitroobvodové testování
IMC vrstva	Intermetalická vrstva
IR zářič	Infračervený zářič
NPI	Zavedení nového produktu
QFN	„Quad Flatpack No-lead“ Pouzdro bez klasických drátových vývodů
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
SPI	„Solder Paste Inspection“ Inspekce pájecí pasty
PWI	Index procesního okna
RSS	Podélný teplotní profil sedlového typu
RTS	Podélný teplotní profil s lineárním nárůstem teploty
TAL	„Time above liquidus“ Čas nad liquidem

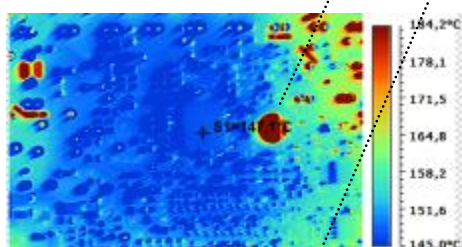
9 PŘÍLOHY A VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

Příloha č. 1 Porovnání metod měření teploty

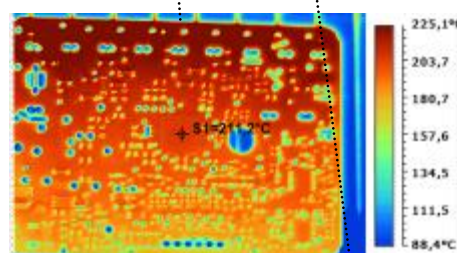
DPS č. IO37102



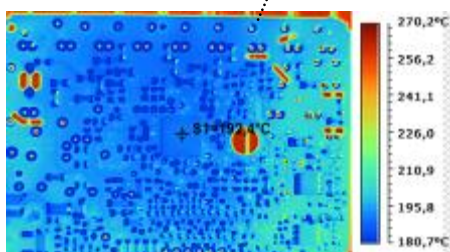
Obrázek 98: Teplotní profil DPS IO37102 (DIMA)



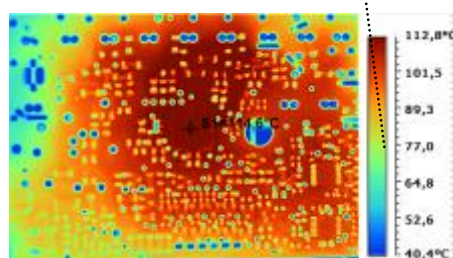
Obrázek 99: Rozložení teplot v čase 102 s.
T=141,1 °C (Zóna přehřevu)



Obrázek 101: Rozložení teplot v čase 230 s.
T=211,2 °C (Zóna přetavení)



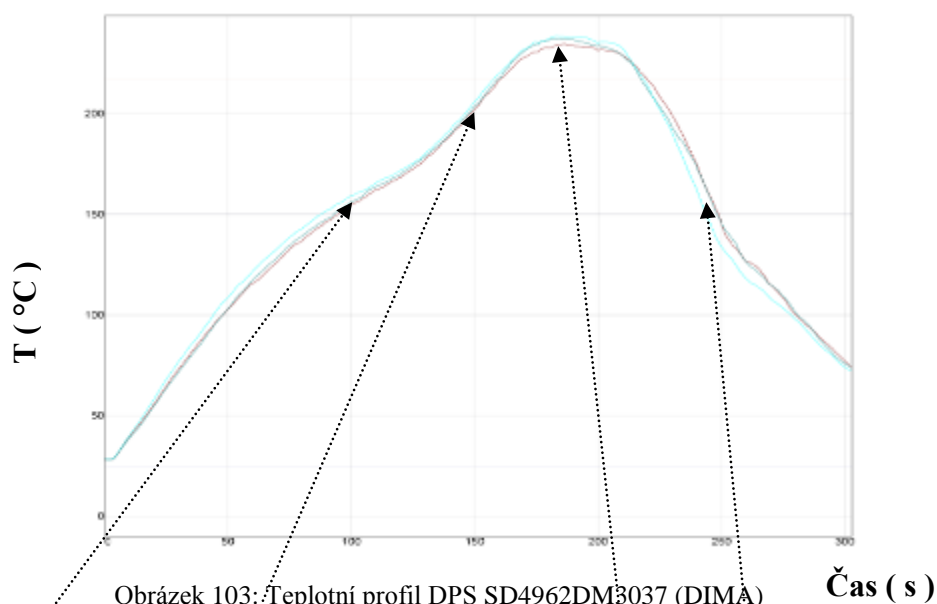
Obrázek 100: Rozložení teplot v čase 153 s.
T=192,4 °C



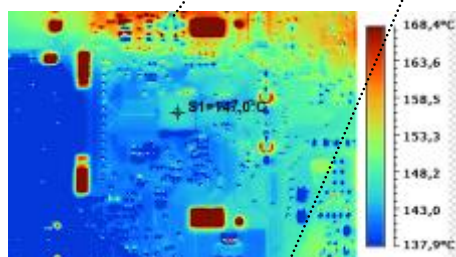
Obrázek 102: Rozložení teplot v čase 280s.
T=114,5°C (Zónachlazení)

Tabulka 30: Hodnoty PWI pro DPS č. IO37102

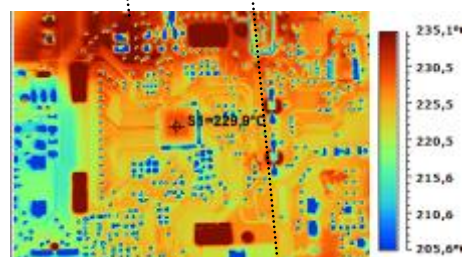
PWI= 100%	Max Rising Slope	Max Falling Slope	Preheat 25-150C	Peak Temp	Tot Time /217C
<TC1>	1.87 50%	-2.64 -9%	85.18 89%	237.39 -1%	64.43 63%
<TC2>	1.99 59%	-2.88 -26%	90.13 100%	231.32 -82%	50.20 -32%
<TC3>	2.15 72%	-2.87 -25%	84.21 87%	239.40 25%	64.75 65%
Delta	0.28	0.24	5.92	8.08	14.55



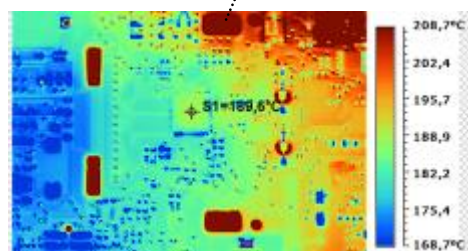
Obrázek 103: Teplotní profil DPS SD4962DM3037 (DIMA)



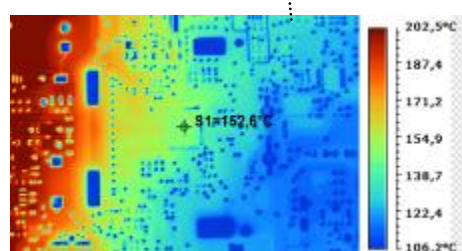
Obrázek 104: Rozložení teplot v čase 105 s.
T=147°C (Zóna předehřevu)



Obrázek 106: Rozložení teplot v čase 184 s.
T=229,9 °C (Zóna přetavení)



Obrázek 105: Rozložení teplot v čase 153 s.
T=189,5 °C



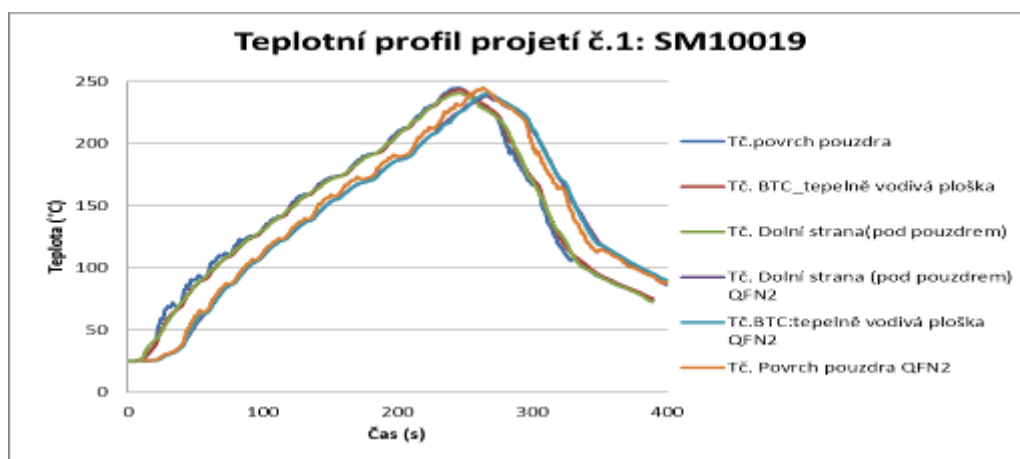
Obrázek 107: Rozložení teplot v čase 256 s.
T=152,6 °C (Zóna chlazení)

Tabulka 31: Hodnoty PWI pro DPS č. SD4962DM3037

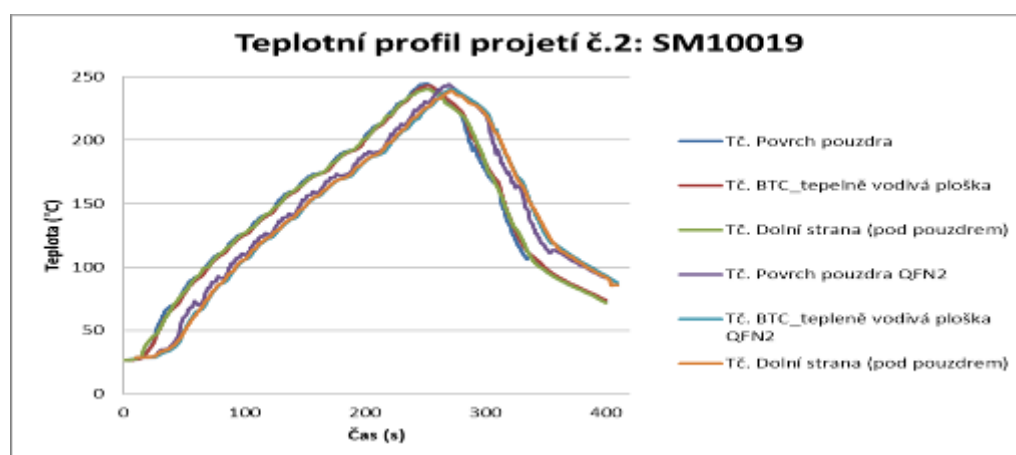
PWI= 110%	Max Rising Slope		Max Falling Slope		Preheat 25-150C	Peak Temp	Tot Time /217C			
<TC5>	1.71	37%	-2.80	-20%	94.47	110%	234.71	-37%	59.74	32%
<TC6>	1.69	35%	-2.42	6%	92.78	106%	237.34	-2%	58.14	21%
<TC7>	1.86	49%	-2.89	-26%	87.63	95%	238.40	12%	60.64	38%
Delta	0.17		0.47		6.84		3.69		2.50	

Příloha č. 2 Profily DPS naměřené na HELLER 1812EXL

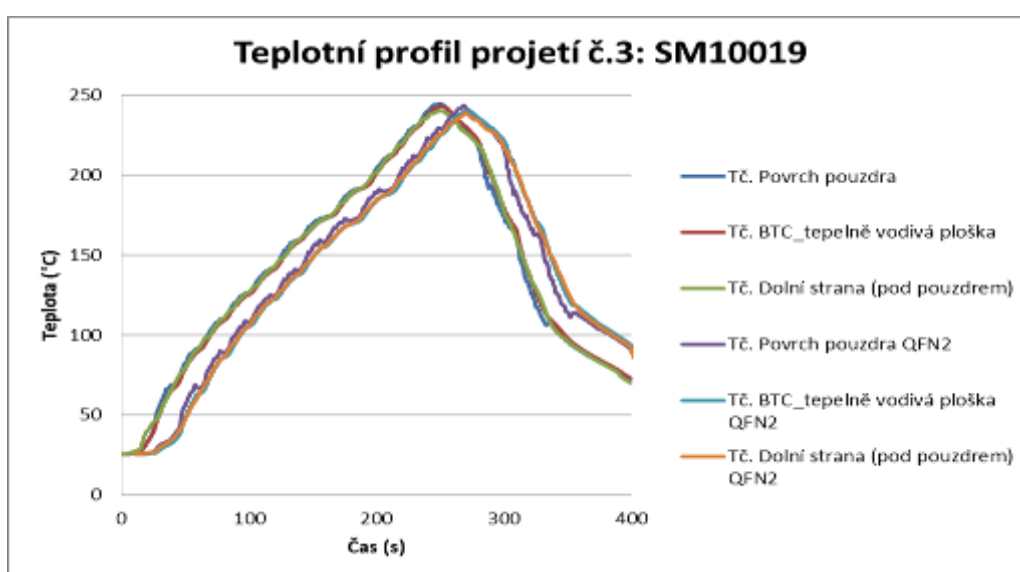
DPS č. SM10019



Obrázek 108: Teplotní profil DPS č.SM10019, HELLER 182 EXL, 1. projektí



Obrázek 109: Teplotní profil DPS č.SM10019, HELLER 182 EXL, 2. projektí



Obrázek 110: Teplotní profil DPS č.SM10019, HELLER 182 EXL, 3. projektí

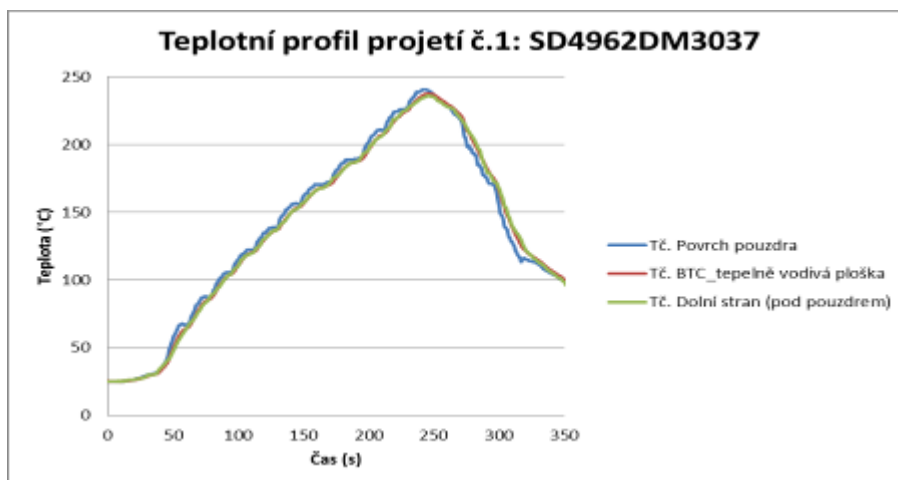
Tabulka 32: Naměřené hodnoty DPS č. SM10019 pomocí a MOLLE, 1. projekt

1. projekt	Gradient ohřevu	Čas mezi teploty	Maximální teplota	Čas nad liquidem	Integrál teploty	Delta=rozdíl mezi teplotami Tč.	Delta = rozdíl vrcholových teplot	Gradient chlazení
	0-150	150-217°C		217°C	217-300°C	20		
	(°C/s)	(s)	(°C)	(s)	(°C*s)	(°C)	(°C)	(°C/s)
Povrch pouzdra	3,22	90	245	65	1049	27	245	-3,2
BTC	2,33	91	243,3	66	1024	27	243	-2,9
Dolní strana	1,72	87	240,6	68	916	28	241	-2,4
Dolní strana QFN2	1,67	90	238,9	61	752	33	239	-2,2
Povrch pouzdra QF2	2,39	90	245	65	986	31	245	-2,8
BTC QFN2	2,06	93	240,6	59	828	32	241	-2,5
Delta						6	6	
Rozdíl	2	6	6	9	297			1
Průměr	2,2	90,2	242,2	64	925,8			-2,7
Odchylka	0,57	1,94	2,56	3,35	116,89			0,37

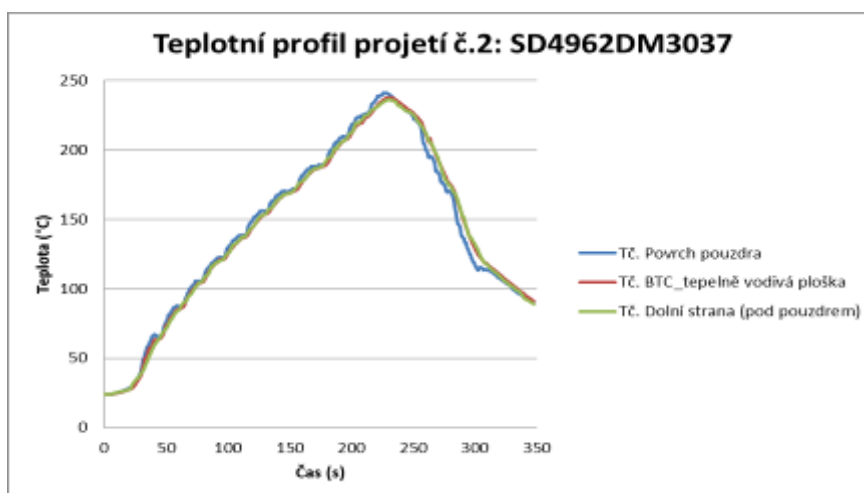
Tabulka 33: Naměřené hodnoty DPS č. SM10019 pomocí a MOLLE, 3. projekt

3. projekt	Gradient ohřevu	Čas mezi teploty	Maximální teplota	Čas nad liquidem	Integrál teploty	Delta=rozdíl mezi teplotami Tč.	Delta = rozdíl vrcholových teplot	Gradient chlazení
	0-150	150-217°C		217°C	217-300°C	20		
	(°C/s)	(s)	(°C)	(s)	(°C*s)	(°C)	(°C)	(°C/s)
Povrch pouzdra	2,61	91	244,4	64	1006	27	244	-3,2
BTC	2,11	90	242,8	64	971	27	243	-2,8
Dolní strana	1,67	87	240	67	875	28	240	-2,4
Dolní strana QFN2	1,61	89	238,9	60	740	31	239	-2,2
Povrch pouzdra QF2	2,39	91	243,3	63	907	32	243	-3,2
BTC QFN2	2	92	240	60	814	31	240	-2,4
Delta						5	5	
Rozdíl	1	5	6	7	266			1
Průměr	2,1	90	241,6	63	885,5			-2,7
Odchylka	0,39	1,79	2,22	2,68	98,68			0,44

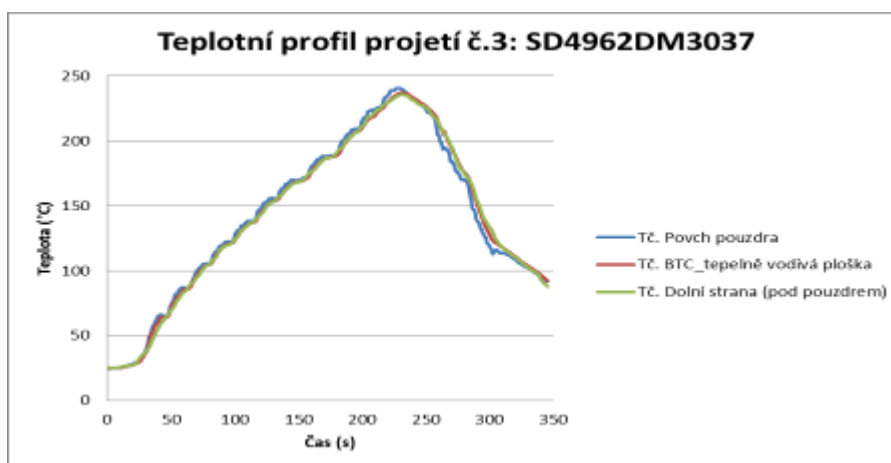
DPS č. SD4962DM3037



Obrázek 111: Teplotní profil DPS č.SD4962DM3037, HELLER 182 EXL, 1. projektí



Obrázek 112: Teplotní profil DPS č.SD4962DM3037, HELLER 182 EXL, 2. projektí



Obrázek 113: Teplotní profil DPS č.SD4962DM3037, HELLER 182 EXL, 3. projektí

Tabulka 34: Naměřené hodnoty DPS č. SD4962DM3037 pomocí a MOLLE, 2. projekt

2. projekt	Gradient ohřevu	Čas mezi teplotami	Maximální teplota	Čas nad liquidem	Integrál teploty	Delta=rozdíl mezi teplotami Tč.	Delta = rozdíl vrcholových teplot	Gradient chlazení
	0-150	150-217°C		217°C	217-300°C	20		
	(°C/s)	(s)	(°C)	(s)	(°C*s)	(°C)	(°C)	(°C/s)
BTC	2,44	79	237,8	55	649	26	238	-2,6
Dolní strana	1,94	79	236,7	55	606	26	237	-2,8
Povrch pouzdra	2,72	80	241,1	56	734	25	241	-3,3
Delta						1	4	
Rozdíl	1	1	4	1	128			1
Průměr	2,4	79,3	238,5	55,3	663			-2,9
Odchylka	0,4	0,58	2,29	0,58	65,14			0,36

Tabulka 35: Naměřené hodnoty DPS č. SD4962DM3037 pomocí a MOLLE, 3. projekt

3. projekt	Gradient ohřevu	Čas mezi teplotami	Maximální teplota	Čas nad liquidem	Integrál teploty	Delta=rozdíl mezi teplotami Tč.	Delta = rozdíl vrcholových teplot	Gradient chlazení
	0-150	150-217°C		217°C	217-300°C	20		
	(°C/s)	(s)	(°C)	(s)	(°C*s)	(°C)	(°C)	(°C/s)
BTC	2,56	81	237,2	54	623	26	237	-2,9
Buttom	1,94	79	236,1	55	585	26	236	-2,8
Povrch pouzdra	2,72	79	240,6	56	717	25	241	-3,4
Delta						1	5	
Rozdíl	1	2	5	2	132			1
Průměr	2,4	79,7	238	55	641,7			-3,1
Odchylka	0,41	1,15	2,35	1	67,95			0,35

Příloha č. 3 Vlastnosti pájecí pasty AIM NC257-2

Bezolovnatá bezoplachová pájecí pasta SAC305

Vlastnosti:

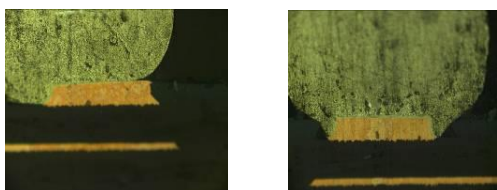
- Kompaktibilní s RoHS
- Široké okno tiskového procesu
- Čisté zkoumání a testování zbytků tavidla na spojích
- Snižuje dutiny pod BGA vývodami
- Kompaktibilní s kondenzačním pájením
- Snižuje efekt zvedání součástek
- 24 hodinová šablonová životnost
- Snižuje zkratky pod čipy
- Skvělá smáčivost
- Bez vrcholků ve spoji
- Čas lepení (zasychání) 12-14 hodin
- Hlavní kovové zatížení 88,5 %

Popis:

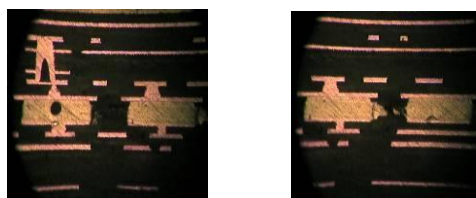
AIM NC257-2 byla vyvinuta tak, aby nabízela velké široké procesní okno pro nanášení, smáčivost a testování spoje sondou. Kvalitní smáčecí schopnost má za následek světlý, hladký a lesklý pájený spoj a byl speciálně vyroben ke snížení pájecích zkratů pod čipy. Nabízí také velmi nízké tavidlové zbytky po procesu, které zůstávají krystalově čisté a snadno zkoumané i při zvýšených teplotách pro dnešní bezolovnaté pájky. Tato pájecí pasta nabízí chemický vývoj pro použití v konvekčním pájení, za předpokladu dobrého roztékání a vlhkostní tolerance k prodloužení životnosti v zařízeních, kde se kontrola životního prostředí není optimální.

Porovnání

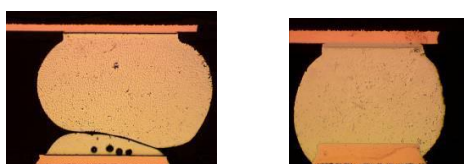
Zlepšené smáčení



Redukce dutin



Eliminace prasklin na pájeném spoji



Tisk

- Aplikovat (naneste) dostatečné množství pasty na šablonu, aby umožnil hladké stírání během tiskového cyklu (průměr 12 až 16 mm ($\frac{1}{2}$ až $\frac{5}{8}$ palec) je obvykle dostačující pro začátek).
- Naneste malé množství čerstvé pájecí pasty na šablonu v řízených (kontrolních) intervalech k udržení chemie pasty a funkčních vlastností.
- AIM NC257-2 zajišťuje nezbytnou dobu zasychání (lepení) a sílu pro dnešní vysokorychlostní umístovací zařízení, které zvyšují výkon a spolehlivost produktu.
- Čištění vaší šablony bude lišit podle způsobu použití; Nicméně, to může být provedeno s použitím AIM 200AX-10 šablonový čistič.

DOPORUČENÁ POČÁTEČNÍ NASTAVENÍ TISKÁRNY NÍŽE JSOU ZÁVISLÉ NA DPS A návrhu plošky

<u>Parametr</u>	<u>Doporučené poč.nastavení</u>
Tlak těrky	0.10-0.30 kg/cm (.6 - 1.7 lbs/In.) na nůž
Rychlost těrky	12-150 mm/s (.5-6"/s)
Vzdálenost rozlomení	Na kontaktu 0,00 mm
vzdálenost oddělení DPS	0.75-2.0 mm (.030-.080")
Rychlost oddělení DPS	Pomalé

Teplotní (pájecí) profil

Dva unikátní profily jsou zobrazeny níže; obojí lze použít v RSS nebo RTS aplikaci, a každý z nich má podobné přetavovací teploty. Oba profily se liší v tom, kde najdou jejich příslušné špičkové teploty, stejně jako čas nad liquidem (TAL). Kratší profil z těchto dvou profilů, by se vztahoval na menší sestavy a delší profil by se vztahoval na větší sestavy, jako jsou propojovací roviny nebo s desky s vysokou hustotou. Šedá oblast definuje procesní okno. Účinnost pece, rozměr desky / kapacita, typ a hustota součástek, vše ovlivňuje konečný profil pro danou sestavu. Tyto profily jsou výchozí body pro zpracování desky s připojenými termočlánky a doporučují se pro optimalizaci procesu.

Kompaktibilní produkty

- AIM Lead-Free Electropure Solder Bar
- Glowcore No-Clean Cored Wire
- NC Paste Flux, No-Clean Tacky Flux
- One-Step Underfill FF35
- NC270WR VOC-Free No-Clean Spray Flux
- Epoxy 4044 Chip Bonding Epoxy
- NC264-5 No-Clean Flux Spray/Foam

Čištění:

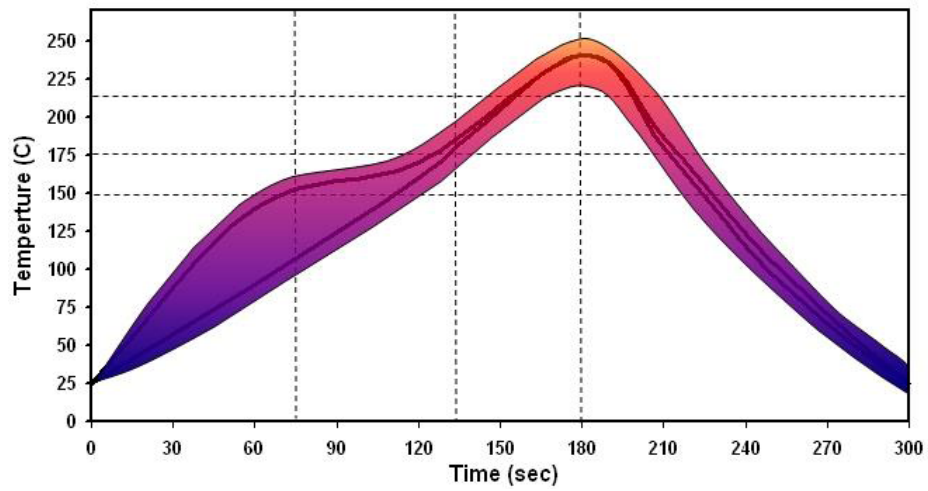
- AIM NC257-2 mohou být čištěny v případě potřeby s saponified vodou nebo vhodným čistícím rozpouštědlem
- Podívejte se prosím na AIM čističe matice pro seznam kompatibilních čišťených materiálů.

Manipulace a Skladování: AIM NC257-2

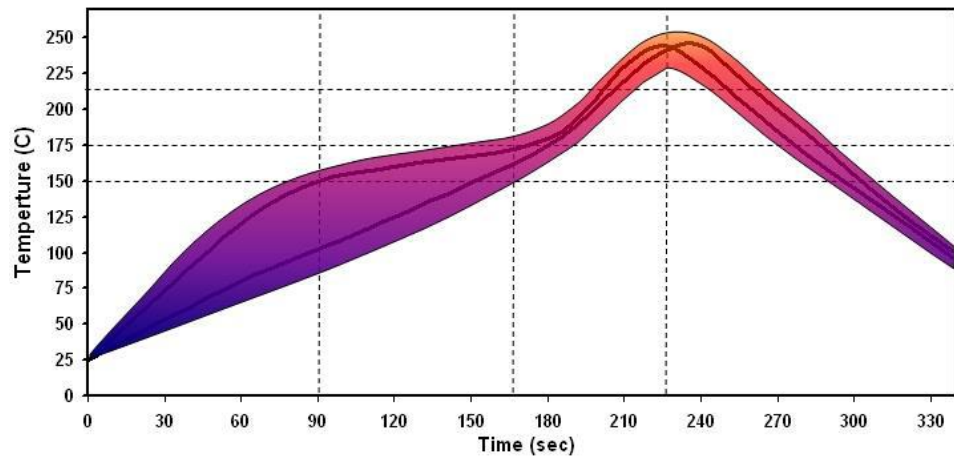
- je nejlepší používat během 1 roku při teplotě 4° C-12° C nebo 6 měsíců při pokojové teplotě.
- Umožňuje(povoluje) pájecí pastě se ohřát kompletně a přirozeně do počáteční teploty (8 hod.) před zlomením těsnění pro použití.
- Mix výrobek lehce a důkladně (1-2 minut. max) zajišťuje rovnoměrné distribuce jakéhokoli oddělené hmotné.
- Neskladujte nové a použité pasty ve stejné nádobě, a obalu
- Nahradit interní plug and cap 500 gram sklenice, aby se zajistily nejlepší možné těsnění.

Rychlost vzestupu 2 °C/s	Vzestup na 150 °C	Vyrovnání 150 °C-170 °C	Vrcholová teplota 230 °C -245 °C	Čas nad liquidem 217 °C	Gradient chlazení ≤4 °C/s	Délka profilu okolního chlazení
Zkrácený profil	≤ 75 s	30-60 s	45-75 s	30-60 s	45±15 s	2,75-3,5 min
Dlouhý profil	≤ 90 s	60-90 s	45-75 s	60-90 s	45±15 s	4,5-5 min

SAC305 Reflow Profile Window For Low Density Boards

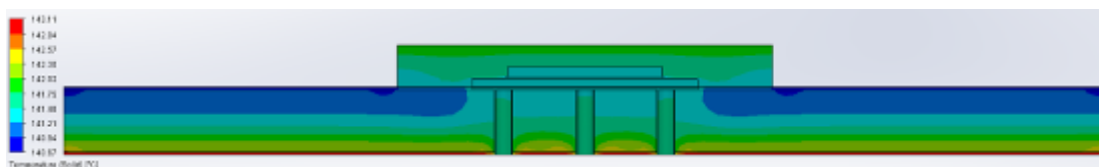


SAC305 Reflow Profile Window For High Density Boards

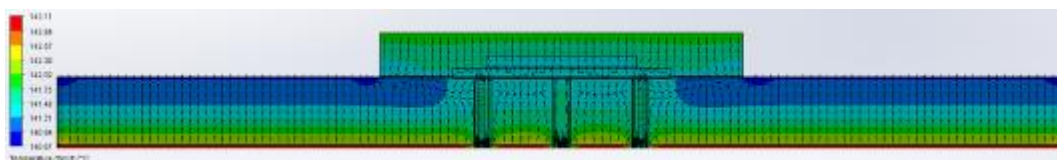


Příloha č. 4 Výsledky ze simulace přestupu tepla QFN pouzdra v SolidWorks

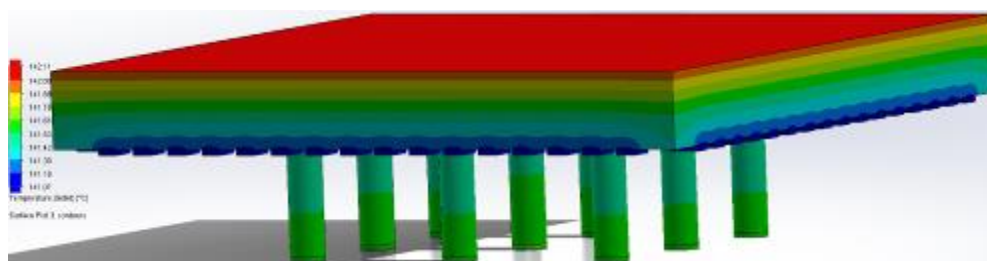
Obrázky ze simulací pro zónu předehřev, čas = 120 s



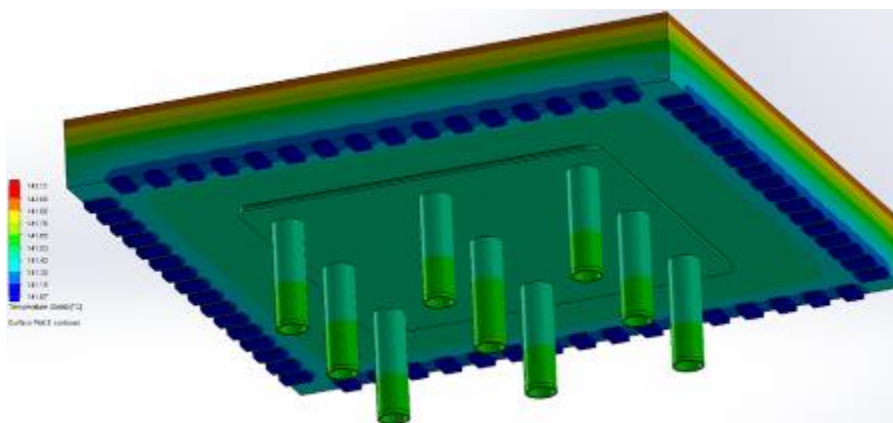
Obrázek 114: Rozložení teplot v řezu pouzdra



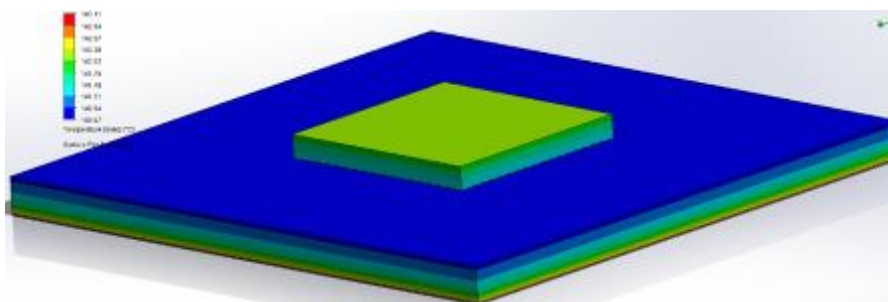
Obrázek 115: Rozložení teplot v řezu pouzdra (tepelný tok)



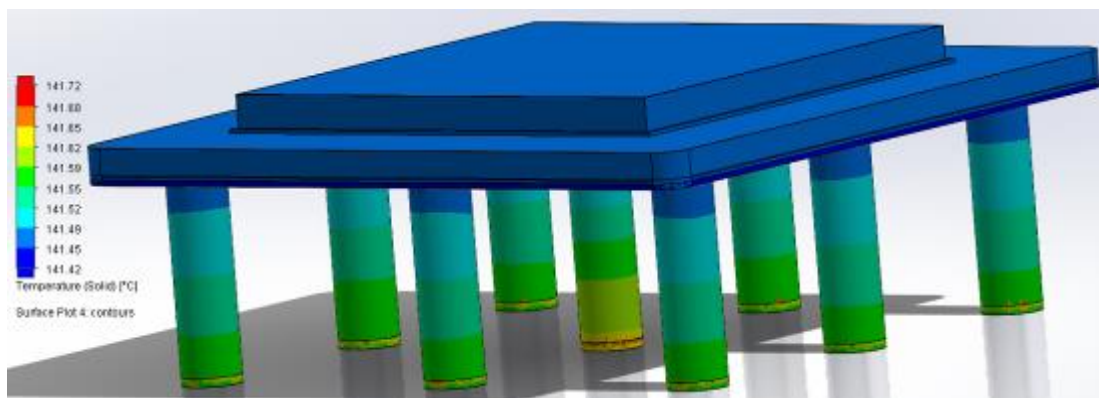
Obrázek 116: Rozložení teplot na otvorech a povrchu pouzdra



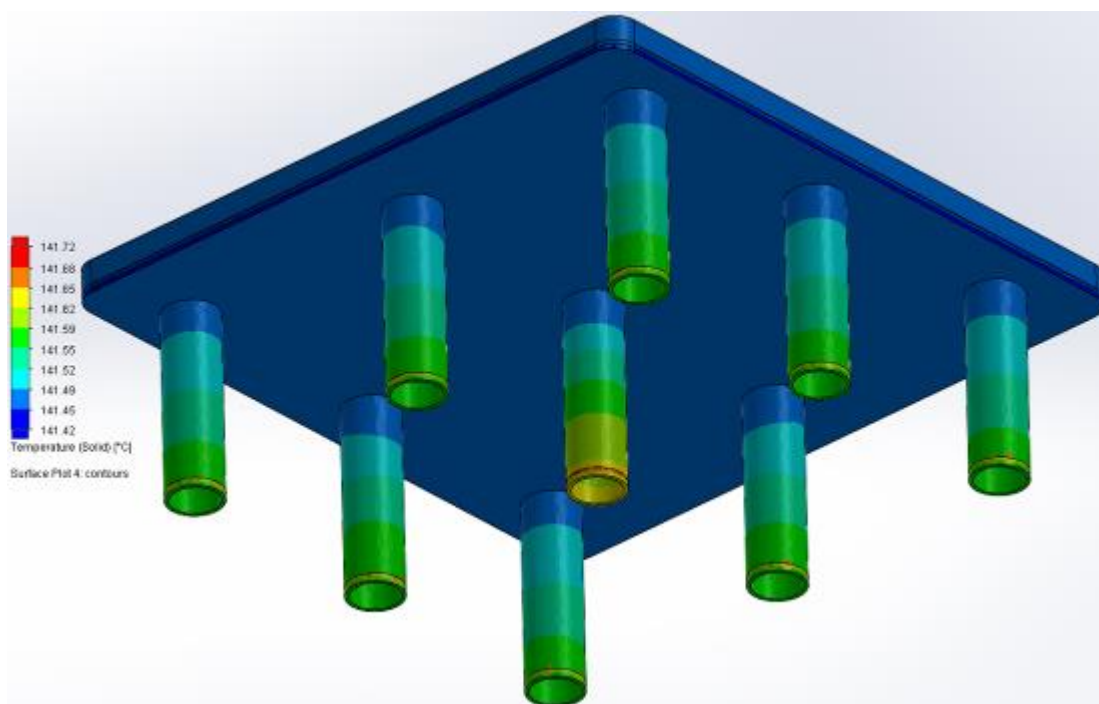
Obrázek 117: Rozložení teplot na otvorech a BTC



Obrázek 118: Rozložení teplot po povrchu QFN pouzdra a FR4

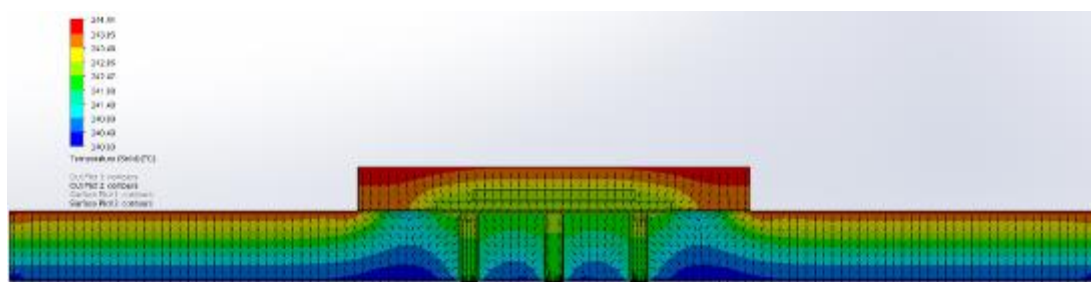


Obrázek 119: Rozložení teplot uvnitř pouzdra a otvorech

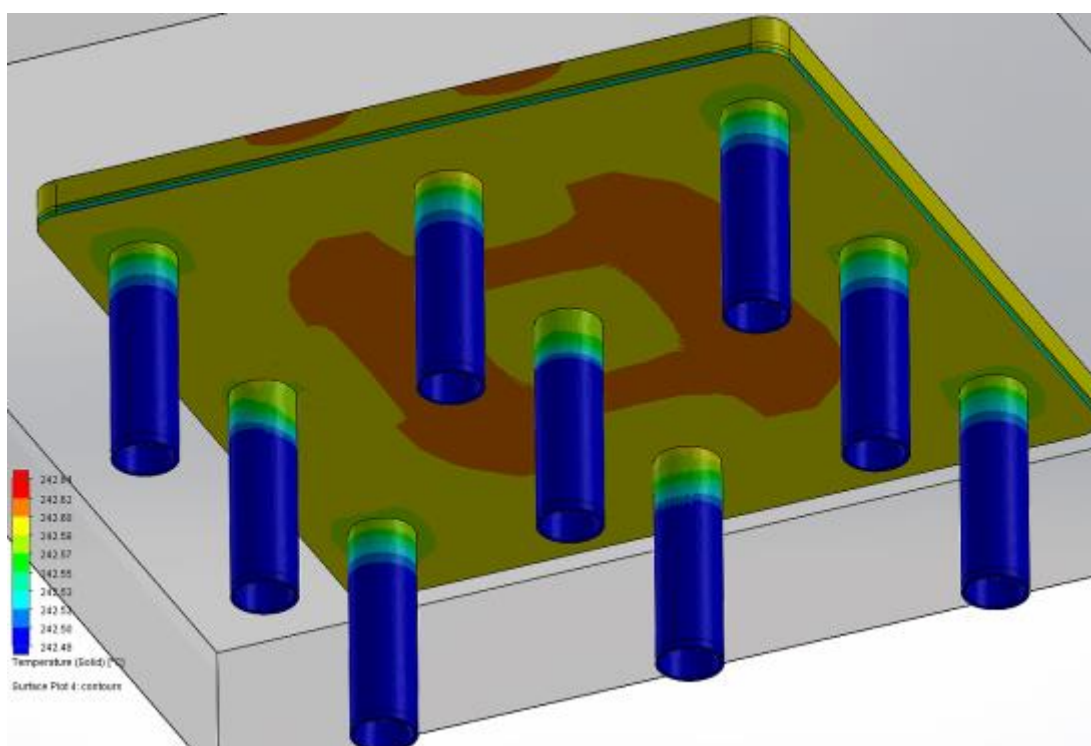


Obrázek 120: Rozložení teplot v otvorech

Obrázky ze simulací pro zónu přetavení, čas = 249 s

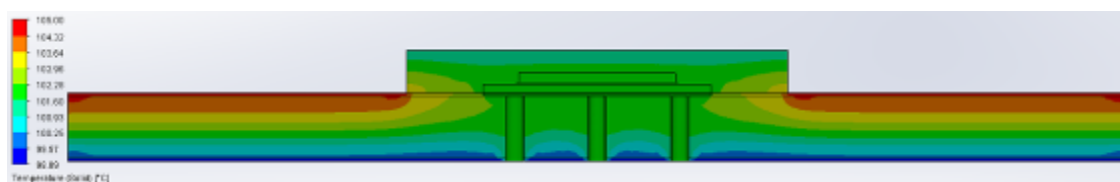


Obrázek 121: Rozložení teplot v řezu pouzdra (tepelný tok)

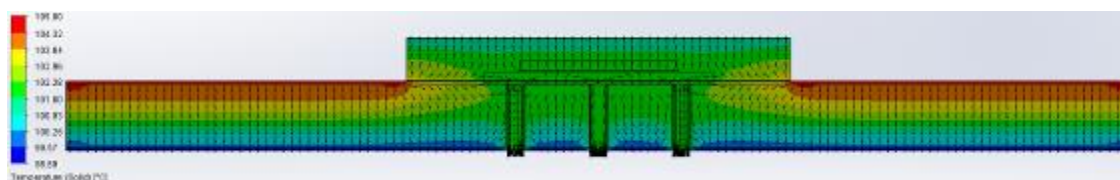


Obrázek 122: Rozložení teplot na otvorech

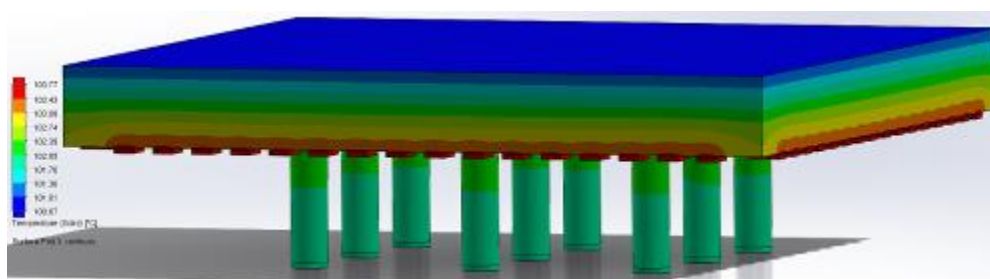
Obrázky ze simulací pro zónu chlazení, čas = 345s



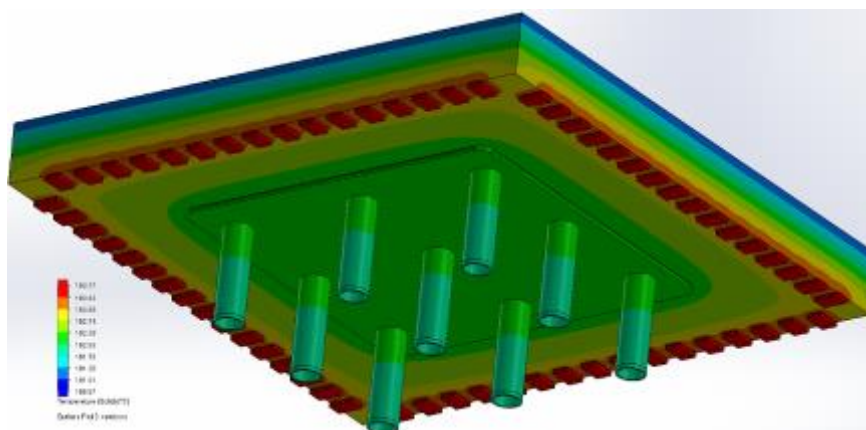
Obrázek 123: Rozložení teplot v řezu pouzdra



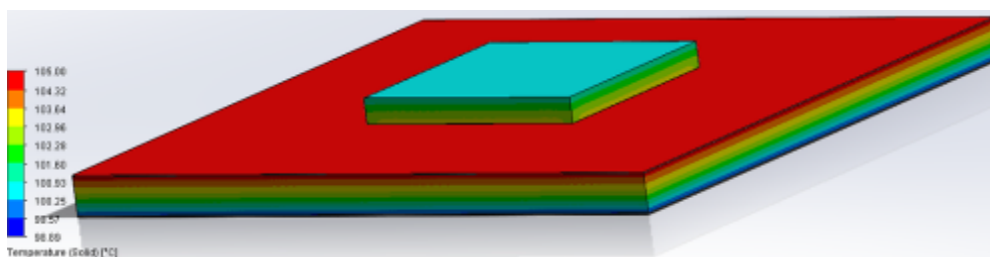
Obrázek 124: Rozložení teplot v řezu pouzdra (tepelný tok)



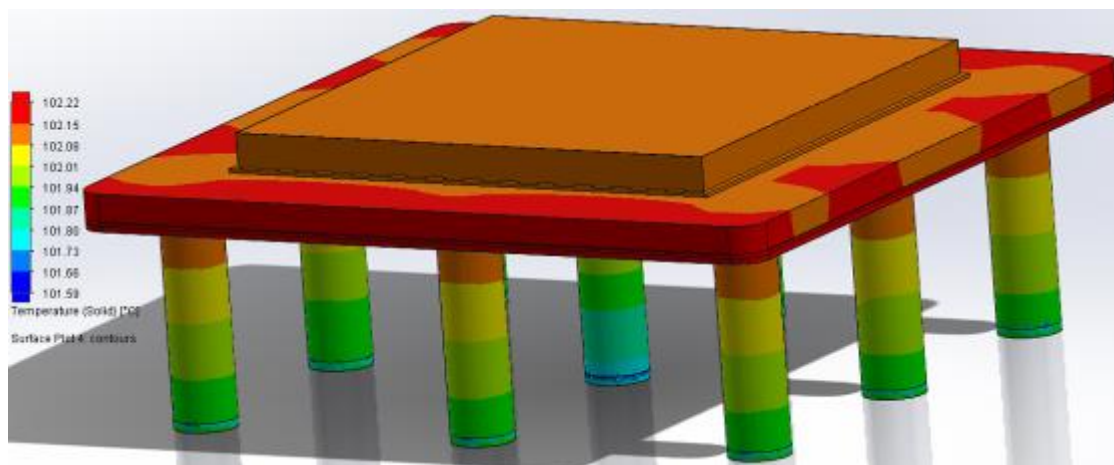
Obrázek 125: Rozložení teplot na povrchu pouzdra a otvorech



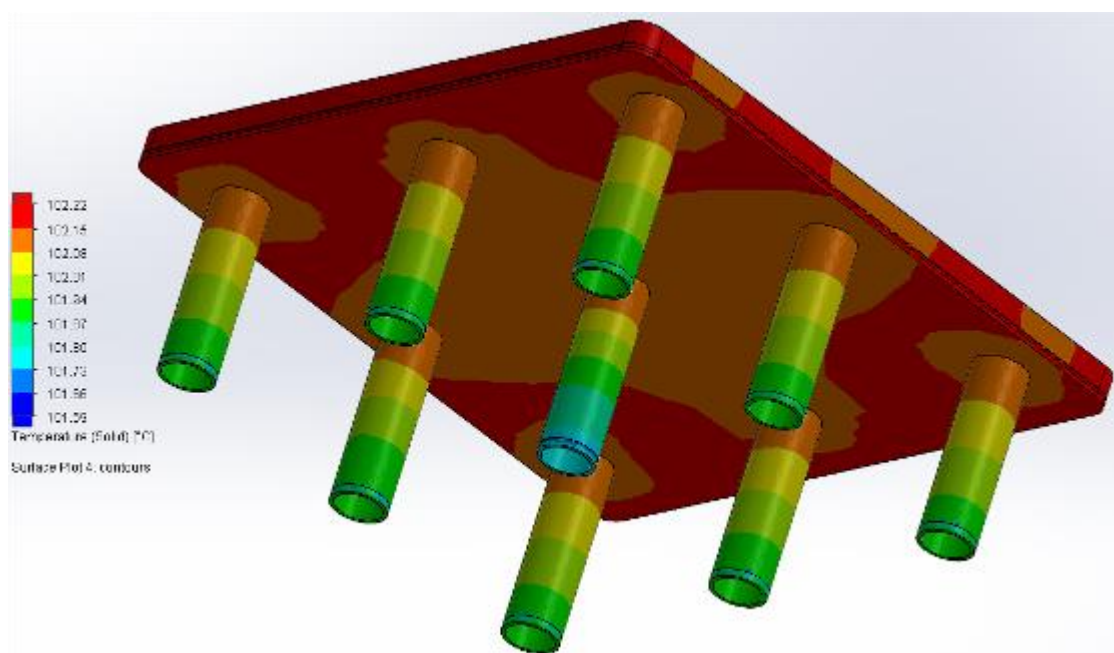
Obrázek 126: Rozložení teplot na BTC a otvorech



Obrázek 127: Rozložení teplot po povrchu pouzdra QFN a FR4

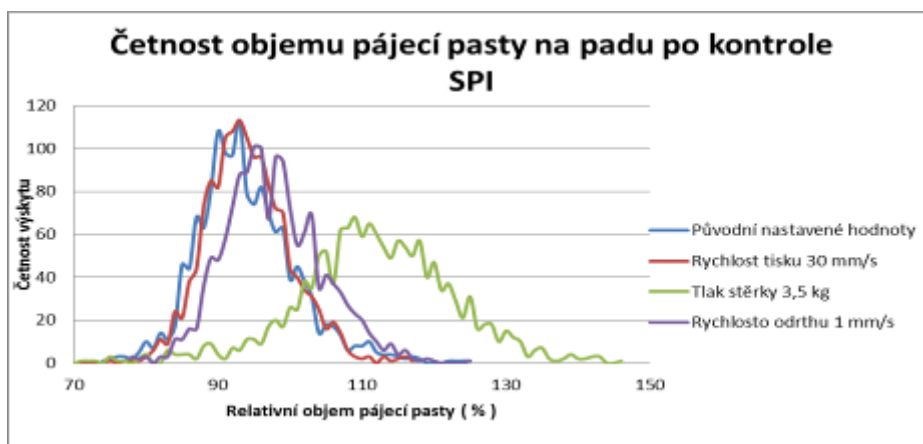


Obrázek 128: Rozložení teplot uvnitř pouzdra a otvorech

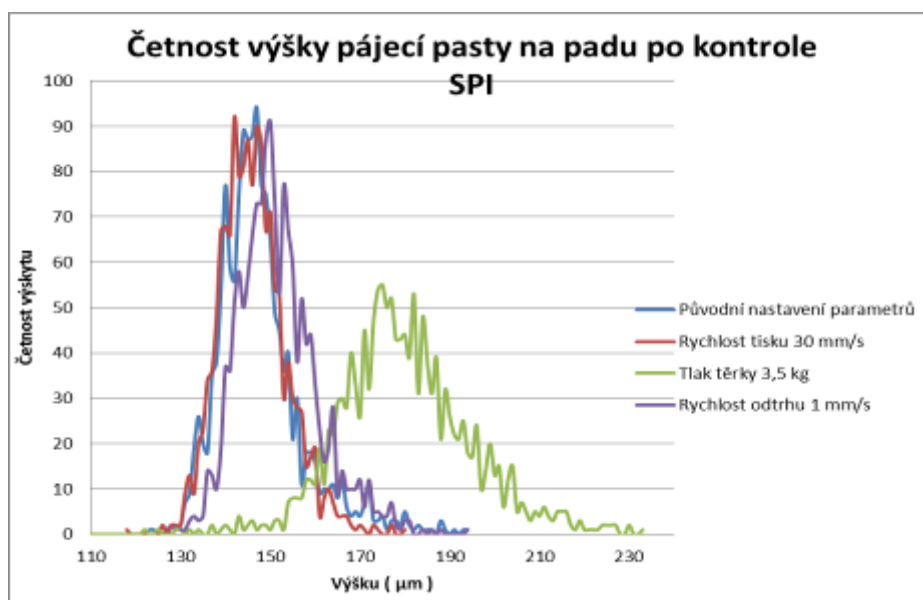


Obrázek 129: Rozložení teplot na otvorech a BTC

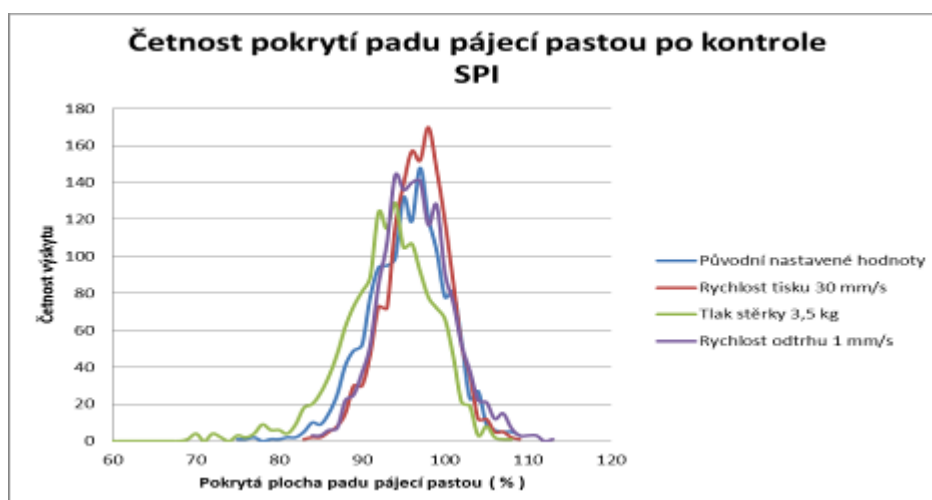
Příloha č. 5 Výsledky SPI pro testování šablonového tisku



Obrázek 130: Zobrazení četnosti objemu pájecí pasty



Obrázek 131: Zobrazení četnosti výšky pájecí pasty



Obrázek 132: Zobrazení četnosti pokrytí padu pájecí pastou